Vibrações e Ruído

Licenciatura – Engenharia Mecantrónica

David Berry

Departamento de Física - Universidade de Évora

2020

Programa

1. **Fundamentos:**
Movimento ondulatório. Frequência, comprimento de onda e velocidade de som. Ondas progressivas. A gama audível de pressões e frequências de som. Pressão de som, potência de som, intensidade de som e impedância acústica. Ondas complexas. A escala de decibel. Contornos de volume igual e ponderação-A. Ondas elásticas. Absorção e atenuação de som. Difração. Reflexão. Interferência e ondas estacionárias. Refração. Problemas.

2. **A propagação de som:**
Introdução. O espalhamento geométrico do som. O monopolo, o dipolo e fontes de pistão vibratório. Campos próximos e distantes de fontes sonoras. Diretividade de fontes sonoras. A previsão de níveis sonoros de fontes sonoras reais. Propagação de som ao ar livre. A absorção do som no ar. Atenuação devida a propagação perto do solo. A refração de som na atmosfera. Barreiras. Outros efeitos de propagação de onda. A previsão de níveis de som ao ar livre e mapeamento de ruído. O efeito de Doppler. Problemas.

3. **Ruído, deteção de sinal e audição:**
Introdução. O ouvido. Aspetos da audição. Audiometria. Tipos e fontes de perda auditiva. Estimativa do risco de perda auditiva induzida por ruído. Avaliação do volume do som. Ruido, o Noy e PNdB. Níveis de ruído aceitáveis dentro de edifícios. Outros efeitos adversos do ruído na saúde. Ruido ambiental**.** Problemas.

4. **Acústica arquitetónica:**
Introdução. Absorção de som. Acústica de sala. Acústica de Sabine: estado transiente. Acústica de Sabine: estado transiente. Acústica de Sabine: estado contínuo. Medições de acústica da sala. Modos de uma sala. Índice de redução de som de partições compostas. Transmissão de som. A medida do isolamento acústico. Problemas.

5. **Vibrações:**
Introdução. A natureza de vibração. Deslocamento, velocidade e aceleração. O comportamento de um sistema amortecedor de molas. Isolamento de vibração. Radiação do som de uma superfície vibratória. Problemas.

Bibliografia

- *Acoustics and Noise Control.* R.J. Peters, B.J. Smith & M. Hollins, Prentice Hall, 2011.
- *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers.* M. Norton & D. Karczub, Cambridge University Press, 2003.
- *Engineering Noise Control: Theory and Practice.* D.A. Bies & C.H. Hansen, Spon Press, 2007.

Avaliação

A aprovação nesta disciplina necessita de uma Nota Final (NF) igual ou superior a 10 valores. Pode ser obtida de duas formas alternativas, à escolha do estudante: realização de duas frequências, ou realização de exame final. Todos os estudantes podem comparecer à primeira frequência (mas não é obrigatória), que será realizada a meio do semestre. A segunda frequência é realizada na data do exame de época normal, podendo o estudante nessa data escolher qual das provas quer realizar - normalmente opta por fazer o exame caso a nota da primeira frequência não lhe seja favorável. No caso da opção por frequências a nota mínima exigida em cada frequência é de 8 valores. A NF será a média das duas frequências e terá de ser positiva. Todos os estudantes podem ir a exame de recurso: tanto os que quiserem fazer uma melhoria de nota NF, como os que anteriormente não obtiveram NF positiva.

Outras informações

Os alunos devem consultar regularmente a plataforma moodle. Ai podem encontrar material de estudo adicional bem como informação sobre as datas e resultados das frequências e exames. Esta plataforma é ainda utilizada para enviar emails aos estudantes com informações relevantes.

De acordo com o artigo 97º do Regulamento Académico, “A frequência de aulas é um direito e um dever do estudante. O estudante deve frequentar pelo menos 75% da totalidade das aulas práticas e teórico-práticas sem prejuízo do disposto no presente regulamento sobre regimes especiais de frequência.”

Regras para as provas de avaliação: Os estudantes devem obrigatoriamente desligar os telemóveis em todas as provas de avaliação. Em nenhuma destas provas é permitido o uso de formulários.

Chama-se ainda a atenção: “A utilização nas aulas de telemóveis, computadores pessoais e outros dispositivos eletrónicos é proibida, a não ser quando contribua positivamente para o processo de ensino e aprendizagem e seja explicitamente autorizada pelo docente.”

1. Fundamentos

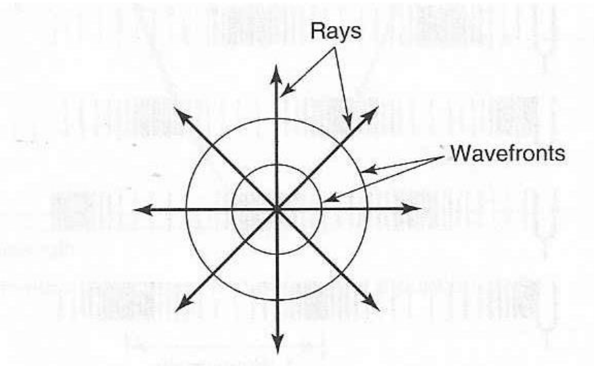
Introdução

As ondas mecânicas são perturbações ou distúrbios que levam energia de um lugar até outro sem uma transferência de massa.

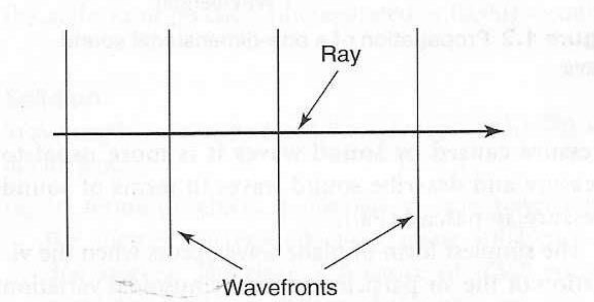
Exemplos:
- ondas em cordas,
- ondas na água, e
- ondas sonoras.

Há dois tipos de ondas sonoras:

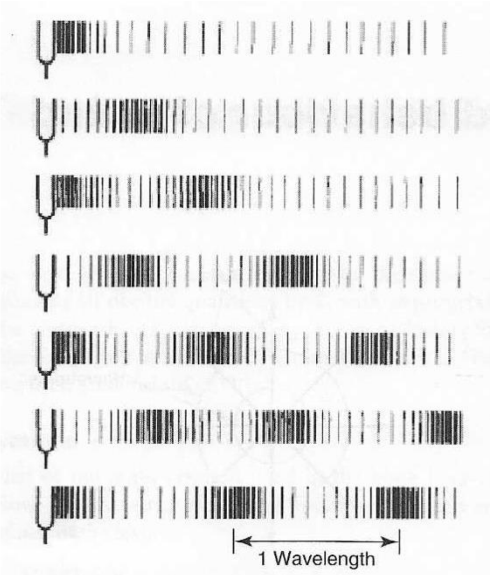
- esféricas:



- planas

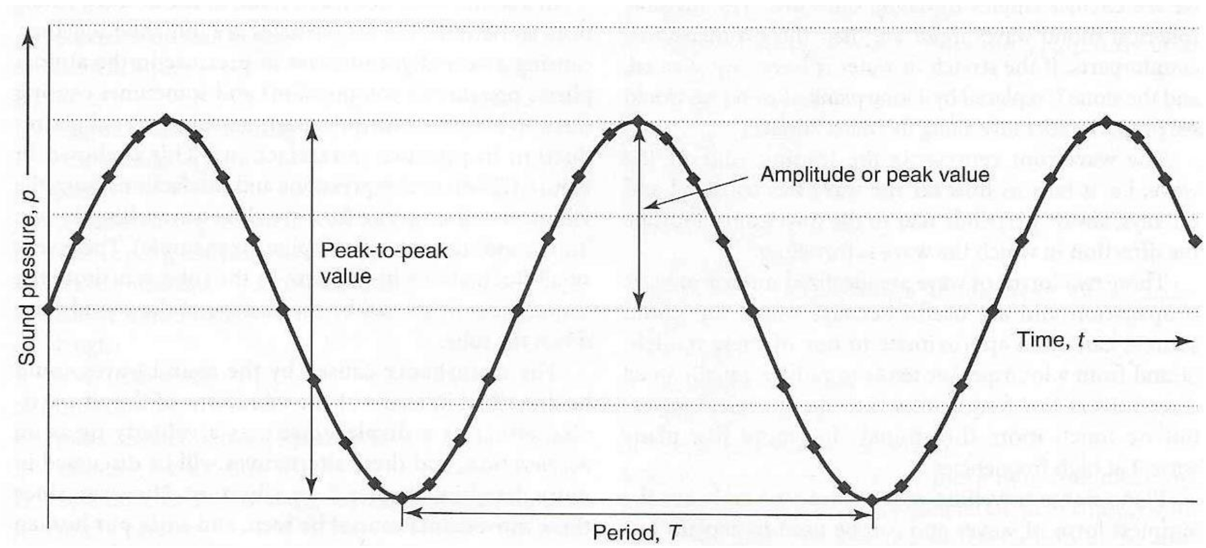


Vamos considerar as ondas planas – podem ser usadas para explicar frequência e o comprimento de onda:



Frequência, comprimento de onda e velocidade de som

A variação da pressão de som com o tempo:

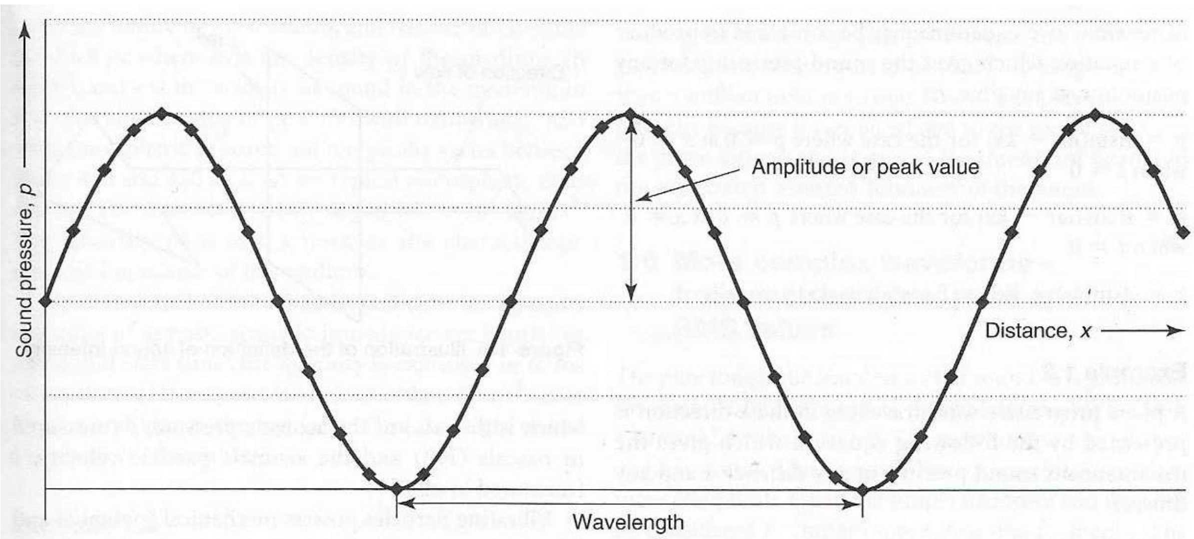


A frequência da onda é dada por:

$$f = \frac{1}{T}$$

onde T é o período medido em segundos, f é a frequência medida em hertz.

A variação da pressão de som com a distância:



Há uma relação simples entre a frequência da onda, o comprimento da onda e a velocidade da onda

$$c = f\lambda$$

Exemplo:

Uma onda plana de som no ar tem uma frequência de 660 Hz (c = 330 m/s). Qual é a diferença de fase

(a) entre dois pontos na onda a uma separação de 0.0125 m no mesmo instante?

(b) na mesma posição, mas com uma separação de 0.0001 s?

Solução:

Agora

$$\lambda = c/f = 330/660 = 0.5 \text{ m}$$

(a) Uma distância de 1 comprimento de onda corresponde a uma diferença de fase de 360º. Assim, 0.125 m corresponde a uma diferença de fase de $360 \times (0.125/0.5) = 90°$

(b) Um intervalo de um ciclo - $1/660 = 0.00152$ s - corresponde a uma diferença de fase de 360º. Assim 0.0001 s corresponde a uma diferença de fase de $360 \times (0.0001/0.00152) = 23.7°$

Ondas Progressivas Planas

A pressão p para qualquer posição, x, a qualquer instante, t é

$$p = A\sin(\omega t - kx)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular e $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda.

Exemplo:

Uma onda plana progressiva a viajar na direção-x é dada por

$$p = 0.9\sin(3142t - 9.25x) \text{ Pa}$$

Determine a frequência, comprimento de onda, a amplitude da pressão sonora e a velocidade do som.

Solução:

f = 500 Hz, $\lambda = 0.68$ Hz, A = 0.9 Pa.

A Gama Audível de Pressões e Frequências de Som

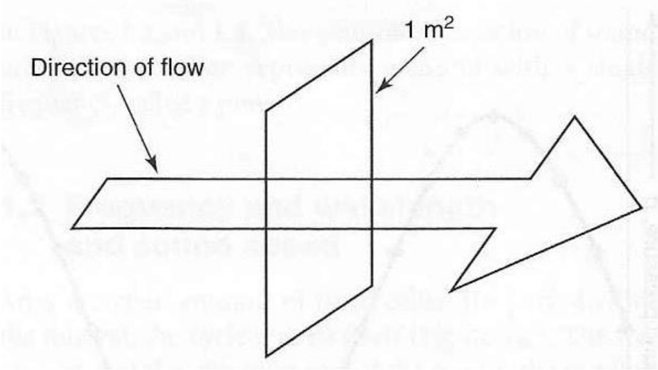
Agora, o ouvido humano pode perceber intensidades sonoras entre o limiar de audição, 2×10^{-5} Pa e o limiar de dor, 20 Pa e gama audível de frequências é

Infra-sónicos [20 Hz até 20 000 Hz] ultra-sónicos

Pressão de som, potência de som, intensidade de som e impedância acústica.

Em qualquer ponto numa onda de som, a relação entre a pressão acústica, a velocidade das partículas e a intensidade do som são relacionadas como:

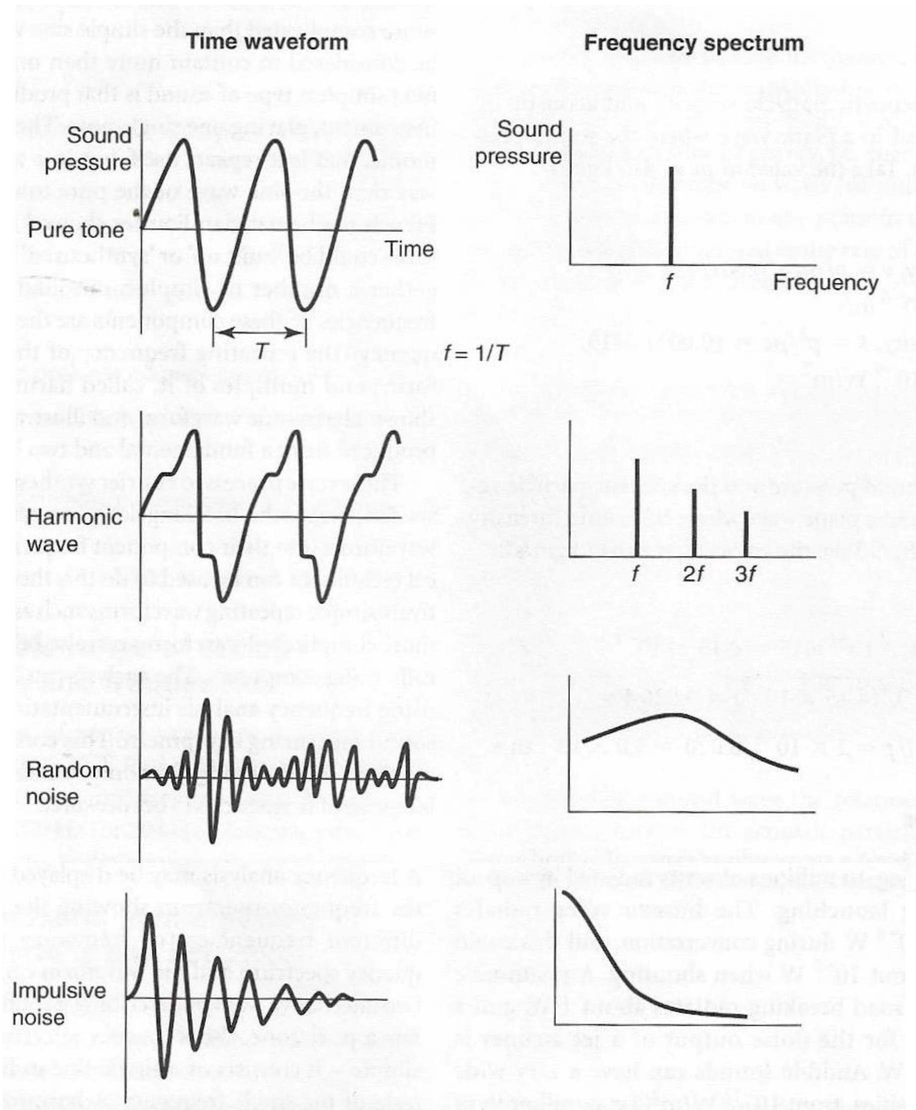
$$p = zv$$
$$I = pv$$
$$I = p^2/z$$
$$I = zv^2$$



onde a impedância característica, $z = \rho c$ para uma onda plana. A intensidade I de uma onda de som é a potência que passa perpendicularmente por uma superfície:

Ondas Complexas

Há vários tipos de ondas e cada onda tem um espetro diferente:



O som não é normalmente constituído de tons de frequência única, mas uma combinação altamente complexa de tons.

Muitas vezes, é preciso saber pelo menos quais bandas de frequências estão presentes, em particular as magnitudes dos tons nas bandas de oitava ou terço de oitava.

Usando filtros, é possível separar uma banda de frequências específicas. Na prática, filtros com bandas de uma oitava ou um terço de oitava são comuns na construção de acústica. As frequências centrais destas bandas são:

Oitava:

16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz

Terço de oitava:

16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000 Hz

A Escala Decibel

Por causa da ordem inconvenientemente grande dos valores envolvidos e por causa da resposta do ouvido não é diretamente proporcional à pressão, é usada uma escala diferente. O *nível* de pressão acústica é

$$L_P = 20 \log P/P_0$$

onde L_P é o nível de pressão do som. P_0é o limiar de audição a 1000 Hz. $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa
e como $I \propto p^2$, o nível de intensidade acústica é então

$$L_I = 10 \log I/I_0$$

A intensidade do som é dada por

$$I = p^2/\rho c$$

onde ρ é a densidade do material e c é a velocidade do som no material. $\rho c (= z)$ é a impedância característica do material e no ar $z = 410$ kg m/s^2 (para água $z = 1.5 \times 10^6$ kg m/s^2).

O limiar de intensidade é então

$$\frac{(2 \times 10^{-5})^2}{410} = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$$

Exemplo:

Determine a pressão do som, a intensidade do som e o nível de intensidade do som a um ponto em que o nível de pressão de som é 7 5 dB. (para ar, $z = 415$ kg m/s^2 ?

Solução:

Sabendo que

$$L_P = 20 \log P/P_0$$

temos

$$\begin{aligned} p &= p_0 10^{L_P/20} \\ &= 2 \times 10^{-5} \times 10^{75/20} = 0.112 \text{ Pa} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} I &= p^2/\rho c \\ &= 0.112^2/415 = 3 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Assim

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \log I/I_0 \\ &= 10\log(3 \times 10^{-5}/1 \times 10^{-12}) = 75 \text{ dB re. } 1 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

Contornos de volume ("*loudness*") iguais e a rede de ponderação-A

O medidor de nível sonoro (decibelímetro) é um equipamento utilizado para realizar a medição dos níveis de pressão sonora. Consiste de um microfone, amplificador e um medidor.

Um decibelímetro clássico consiste de um transdutor eletroacústico, que pode ser um microfone ou um acelerômetro, ambos muito sensíveis, para detetar o som e convertê-lo em um sinal elétrico. O transdutor é seguido de um circuito eletrônico para operar no sinal até que as características desejadas possam ser medidas. Esse circuito eletrônico é composto por um circuito amplificador, já que o sinal é de baixa intensidade (da ordem de milivolts), e por um transformador AC-DC.

Em alguns decibelímetros o circuito também pode conter uma rede de ponderação A, B, C ou D, conforme a curva de compensação selecionada para medir. Após a amplificação, o sinal terá um nível suficientemente alto para ser exibido por um medidor, que pode ser um voltímetro comum.

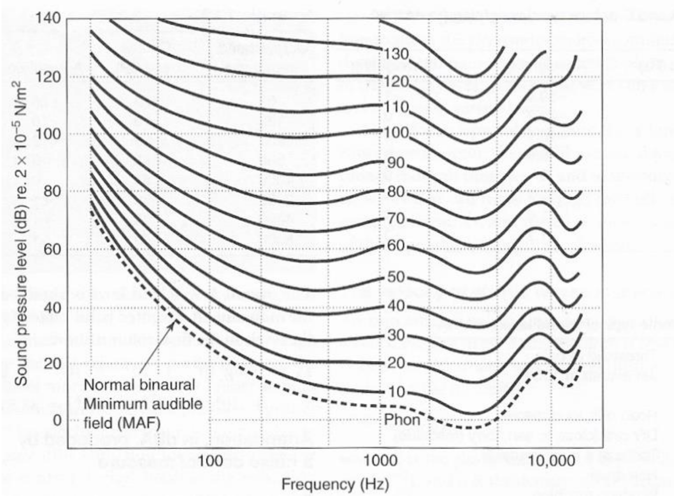
Agora, a maioria das medições de ruido são de decibéis de ponderação-A, dBA.

A ponderação-A é o resultado de uma rede eletrônica de ponderação de frequências no medidor de som, que tenta incorporar a resposta humana a diferentes frequências na leitura indicada por um medidor de nível de som, para que se relacione com o volume (*loudness*) do ruído.

Loudness é uma medida da impressão subjetiva da magnitude de um som e é relacionado com:

- a intensidade do som
- a frequência do som.

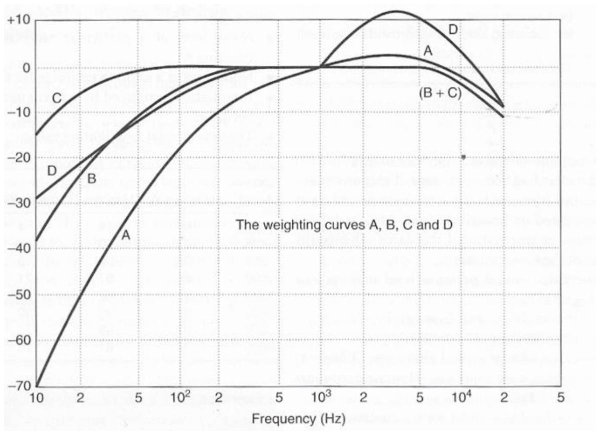
A ponderação tenta simular os contornos de volume iguais, que mostram como a intensidade dos tons puros está relacionada ao nível e à frequência da pressão sonora:



Cada curva é determinada a partir dos resultados de experimentos em que os ouvintes foram solicitados a julgar entre o volume de um tom de referência em 1000 Hz, definido num nível constante e um tom de teste numa outra frequência, e

- o nível do tom de teste é ajustado até que o sujeito julgue que os dois tons são igualmente altos.

Assim, a ponderação-A tem a forma:



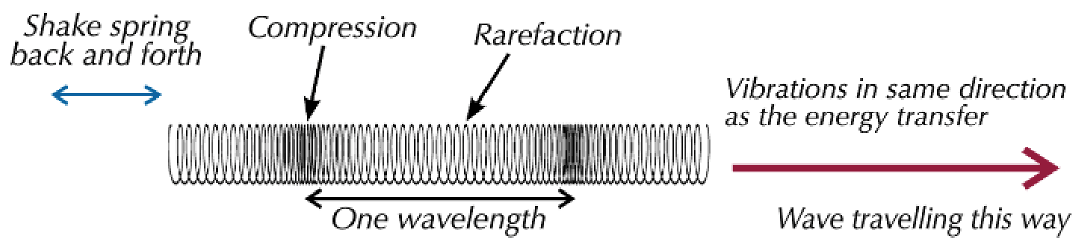
(vamos ignorar a ponderação-B, C e D).

Tipos de Ondas Elásticas

Há dois tipos de ondas elásticas:

- ondas compressivas:

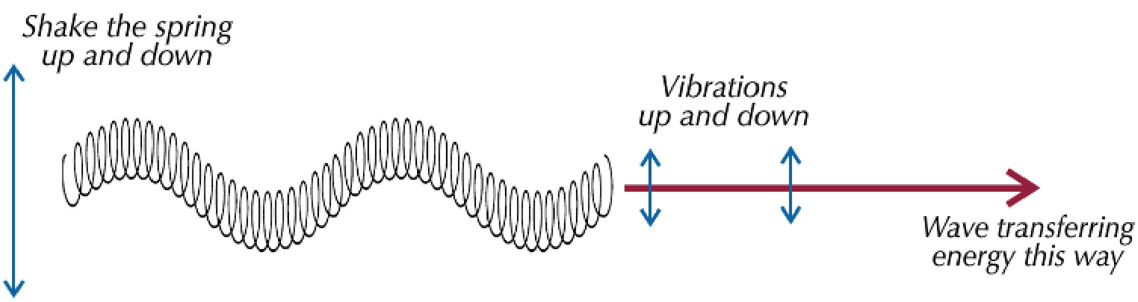
O deslocamento das partículas é ao longo da direção da propagação:



e são ondas **longitudinais**.

- ondas de cisalhamento (*shear waves*)

O deslocamento das partículas é perpendicular à direção da propagação:



E são ondas **transversais**.

Ao contrário de sólidos, líquidos e gases não podem transmitir ondas de cisalhamento e o único tipo de onda que pode ser transmitida num gás é a onda compressiva.

Ondas compressíveis e de cisalhamento são importantes na transmissão de vibrações pelo solo (de carros, comboios, atividades de construção) etc.

A velocidade de onda de uma onda compressiva é:

$$C = \sqrt{(K/\rho)}$$

onde K é o módulo de elasticidade ($\mathrm{N/m^2}$) e ρ é a densidade do meio ($\mathrm{kg/m^3}$)

Para ondas compressíveis num líquido ou num gás, o módulo de elasticidade chama-se o módulo em massa (*bulk* modulus). Num gás há dois tipos do módulo em massa dependendo do escoamento de calor durante as compressões e as rarefações da onda de som - se as alterações são isotérmicas ou adiabáticas.

De facto, as compressões e as rarefações ocorrem sob condições adiabáticas e

$$K = \gamma P$$

onde γ depende do gás (1.4 para ar) e P é a pressão atmosférica.
Assim

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{(\gamma P/\rho)} \\ &= \sqrt{(1.4 \times 101{,}000)/1.2} \\ &= 343.3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Usando a equação universal dos gases, podemos mostrar que *c* depende da temperatura

$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

onde R é o constante universal dos gases.

Absorção e Atenuação de Som

A absorção de som é um processo pelo qual

- a energia sonora é perdida de uma onda sonora e convertida em calor como resultado de algum tipo de processo de atrito.

Os processos de absorção podem ocorrer no meio transmissor de som ou na interface com outro meio, durante a reflexão e a dispersão.

- absorção é dependente da humidade relativa do ar.

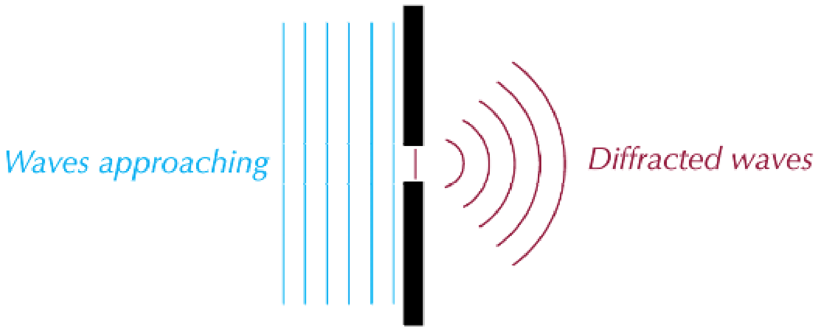
Há uma diferença entre absorção e atenuação:

Atenuação é a redução do nível do som por qualquer processo (não apenas por absorção) e inclui espalhamento esférico e os efeitos de difração, reflexão, interferência e refração.

Difração, Reflexão, Interferência e Refração

Difração:

Tem haver com a interação entre ondas de som e objetos sólidos.

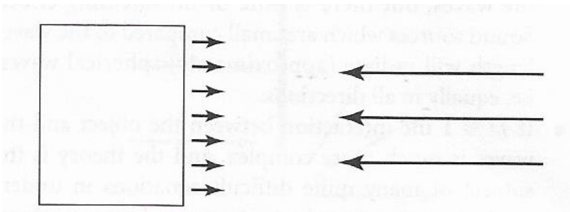
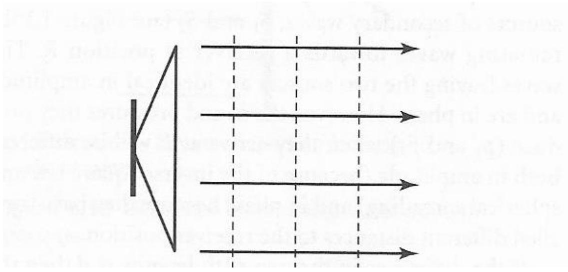


Difração é importante na determinação

- da eficácia das barreiras acústicas
- da direcionalidade das fontes de ruído
- da direcionalidade de microfones
- a dispersão do som por objetos

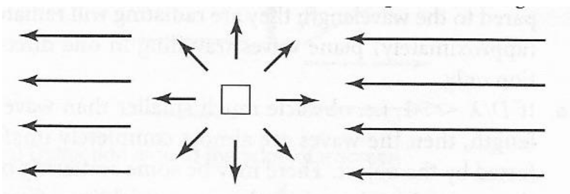
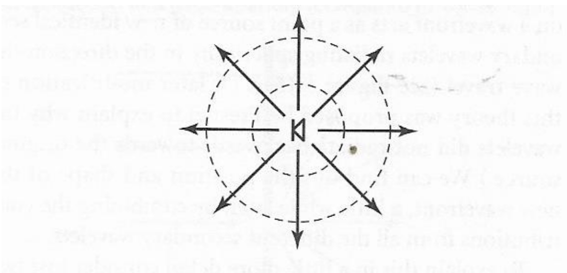
Vamos considerar um objeto de tamanho D e uma onda de comprimento de onda λ.

1. Se $D/\lambda \gg 1$

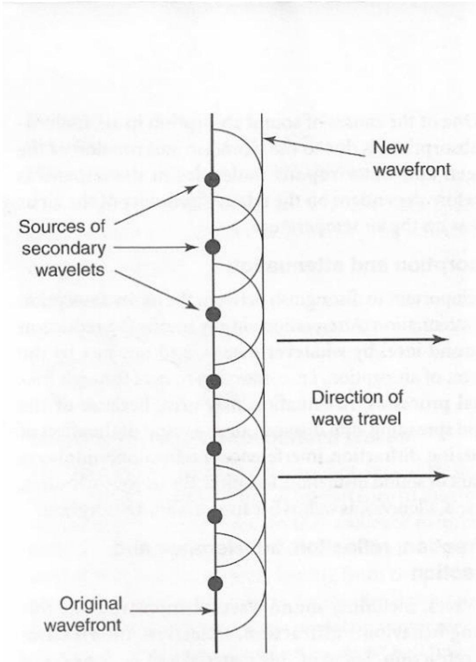
- o objeto lança uma sombra nítida atrás dele

2. Se $D/\lambda \ll 1$

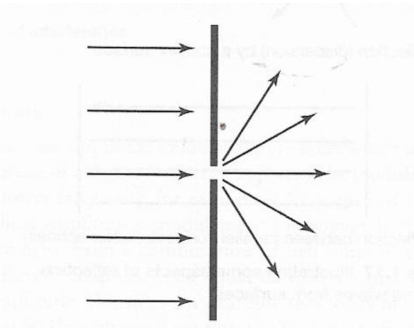
- as ondas não são afetadas pelo objeto (mas há alguma dispersão).

Porque o som se curva em torno das bordas?



- De acordo com Huygens, todos os pontos numa *frente de onda* atuam como fonte pontual de novas *wavelets* secundárias idênticas, irradiando esfericamente na direção do deslocamento das ondas:

Podemos descobrir a posição e a forma da nova frente de onda combinando as contribuições de todas as diferentes frentes de onda secundárias.



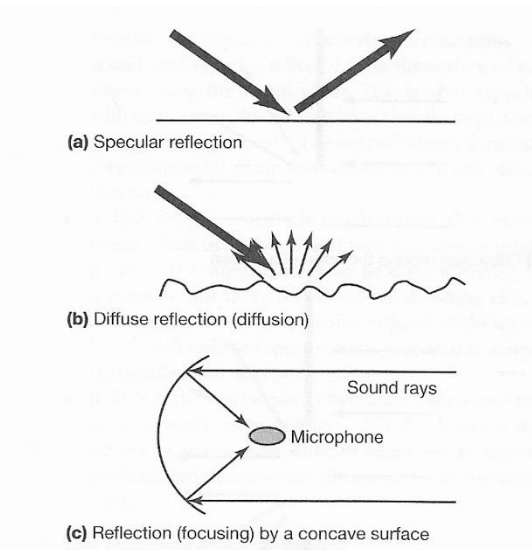
O que isso nos diz é que, para criar uma frente de onda de avião completamente nova, são necessárias contribuições para toda a frente de onda original. Nos casos em que a onda encontra um obstáculo ou passa por uma abertura, são as ondas da borda da frente da onda que se espalham para a zona de sombra.

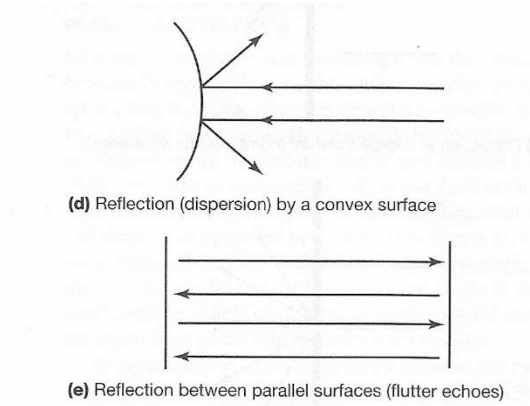
Reflexão:

Este é um caso especial de difração.

Quando as ondas sonoras encontram uma superfície grande em comparação com o comprimento de onda, o som é refletido.

Existem vários tipos de reflexão:





Uma parede próxima pode refletir o som e aumentar os níveis de pressão sonora em comparação com posições semelhantes a distâncias similares da fonte: - perto da superfície, pode haver um aumento de 6 dB. Em distâncias maiores, o aumento é de apenas 3 dB.

A fração da energia sonora, R, refletida numa interface entre dois meios com impedâncias acústicas z_1 e z_2, é

$$R = [(z_1 - z_2)/(z_1 + z_2)]^2$$

Para a interface ar-água, acústicas $z_1 = 415 \text{ kgm/s}^2$ (ar) e $z_1 = 1.5 \times 10^6 \text{ kgm/s}^2$ (água), e $R = 0.998$. Então, só uma fração da energia é transmitida ~0.002

Interferência e Ondas estacionárias

Este fenômeno descreve o que acontece quando duas ou mais ondas sonoras se encontram.

A situação é governada pelo princípio da **superposição**:

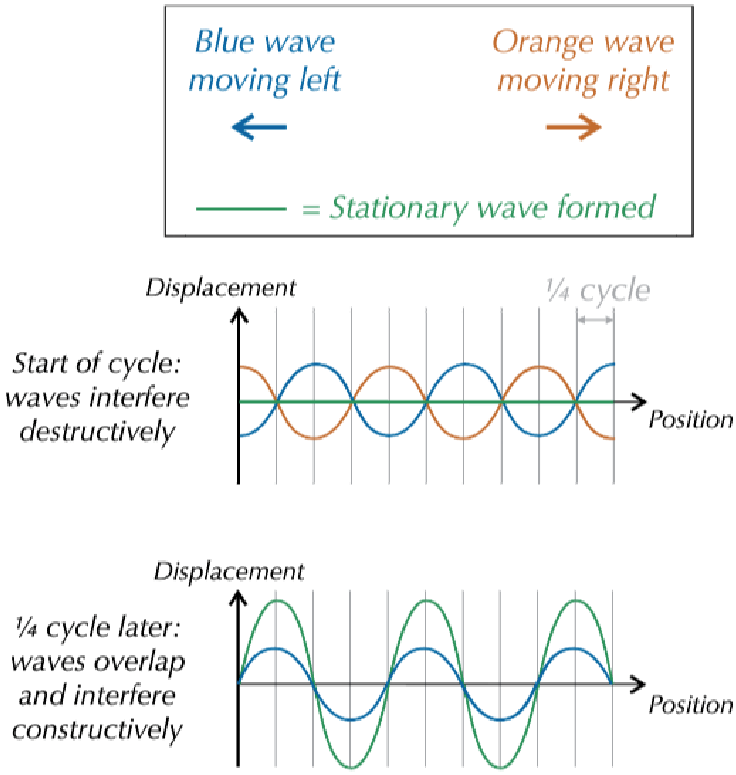
- a perturbação total (pressão sonora, velocidade, deslocamento, aceleração das partículas), em qualquer ponto é a soma algébrica da perturbação causada por cada uma das ondas naquele ponto naquele momento no tempo.

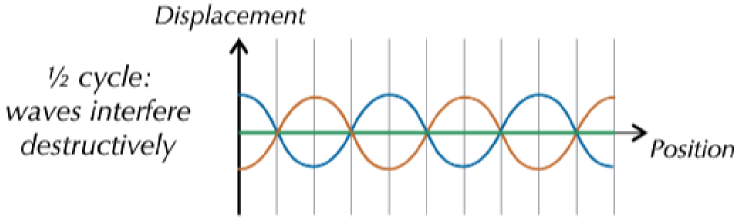
Para ter interferência, as ondas precisam ser **coerentes** (as ondas têm que ter a mesma forma).

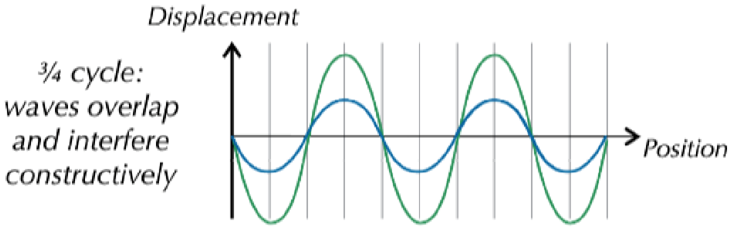
Há dois tipos de interferência:

- Interferência construtiva

- Interferência destrutiva

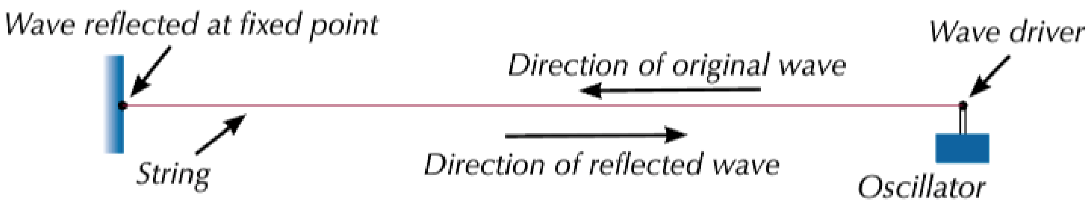




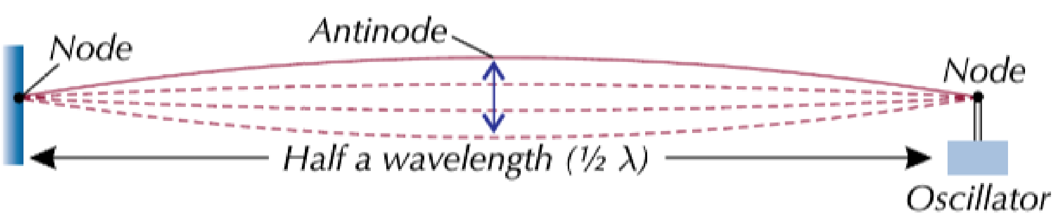


Ondas estacionárias são ondas de amplitude variável e com nós fixos. Essas ondas são superposições de ondas que avançam numa mesma direção, mas em sentidos opostos, de tal maneira que a sua interferência provoca a formação de uma configuração estacionária ou permanente de vibração.

Podemos demonstrar ondas estacionárias:



Se o oscilador produzir um número exato de ondas no tempo que leva para uma onda de chegar à extremidade e volta novamente, então as ondas originais e reflectidas se reforçam mutuamente.



Ressonância ocorre quando a frequência de vibração da fonte gera uma perturbação, cujo comprimento de onda é igual ao dobro do comprimento do tubo e

$$\lambda_n = 2L/n$$

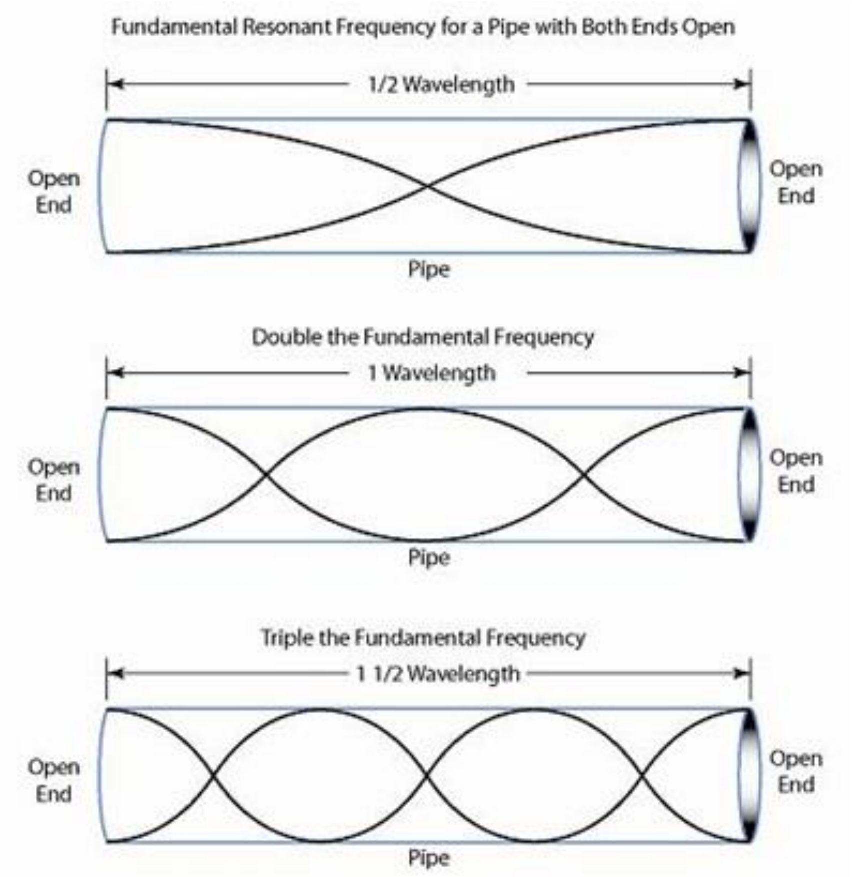
são os comprimentos de onda dos diversos harmónicos que podem ser gerados onde n = 1, 2, 3, ...

As frequências desses harmónicos satisfazem a condição

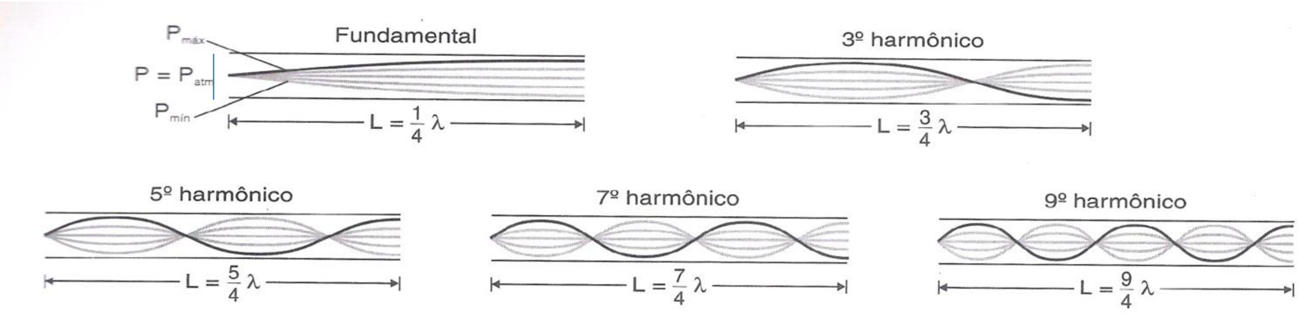
$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{nc}{2L} = nf_1$$

A frequência $f_1 = c/2L$ é a frequência fundamental.

Para o caso de ondas estacionárias longitudinais produzidos no interior de um tubo cujas extremidades são abertas:



Para o caso de ondas estacionárias longitudinais produzidas no interior de um tubo que tem uma extremidade aberta e outra fechada, as ondas de variação de pressão têm a forma:



Neste caso

$$\lambda_n = 4L/n$$

onde $n = 1, 3, 5, \ldots.$

As frequências desses harmónicos satisfazem a condição

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{nc}{4L} = nf_1$$

A frequência $f_1 = c/4L$ é a frequência fundamental.

Exemplo:

Para que valor de frequência o ouvido humano é mais sensível, se, em média, o ouvido externo tem um canal auditivo cujo comprimento é da ordem de 2.7 cm?

Solução:

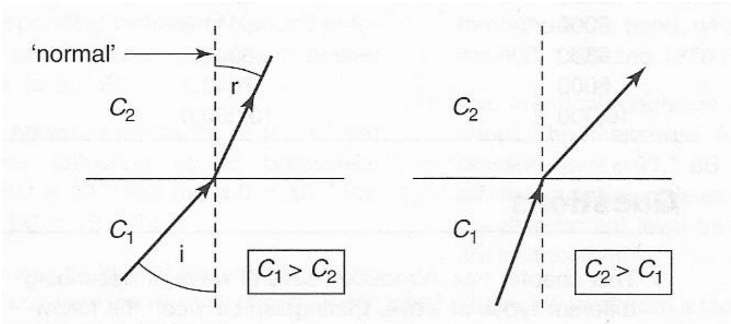
Esse caso corresponde a um tubo de L = 2.7 cm com ar, uma extremidade aberta e outra fechada. Como a onda sonora se propaga no ar a 340 m/s, a frequência fundamental é

$$f_n = \frac{c}{4L} = \frac{340}{4 \times 2.7 \times 10^{-2}} = 3148 \text{ Hz}$$

Esse valor corresponde à frequência para a qual o ouvido humano é mais sensível.

Refração

Refração é a mudança de direção de uma onda que ocorre quando a onda se propaga de um meio com velocidade de onda C_1 para outro meio com velocidade de onda C_2.



Problemas

1. Determine a faixa do nível de potência sonora (re. 10^{-12} W da voz humana, que é de 10 a 50 μW.

2. Uma onda sonora plana no ar tem uma única frequência de 500 Hz. Qual é a diferença de fase (a) entre dois pontos da onda a uma distância de 0.51 m de distância, no mesmo momento? (b) na mesma posição, mas separados por 0.001 s? (Velocidade de som = 340 m/s).

3. Por quanto a intensidade sonora, o nível de pressão sonora e o nível de intensidade sonora produzidos num determinado ponto aumentam se a pressão sonora for aumentada (a) 5 vezes, (b) 15 vezes, (c) 25 vezes?

4. O nível de ruído de uma fábrica com dez máquinas idênticas medido perto de um imóvel residencial foi medido como sendo 54 dB. O máximo valor permitido é 50 dB a noite. Quantas máquinas podem ser usadas durante a noite?

5. O nível de som reverberante numa fábrica é de 83 dB. Quando uma nova máquina foi testada na fábrica, o espectro abaixo foi registado. Calcule o número máximo de máquinas que podem ser instaladas na fábrica se o nível de som de ponderação-A não exceder 85 dB.

Banda oitava (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nível (dB)	64	76	73	69	66	64	59	50
Ponderação-A (dB)	-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1

6. Considere ondas estacionárias.

(a) Calcule a frequência dos três primeiros modos de vibração de uma corda de comprimento de 5.0 m, se a velocidade das ondas transversais que se propagam ao longo da corda for 200 m / s.

(b) A velocidade das ondas que se propagam ao longo da corda é proporcional à raiz quadrada da tensão na corda. Como as frequências mudariam se a tensão da corda fosse dobrada?

7. Considere a propagação de som.

(a) A variação da pressão de uma onda no ar é representada pela equação

$$p = 0.9\cos(1608t - 4.73x)\ \text{Pa}$$

Determine a frequência, comprimento de onda e o valor de L_p (re. 20 μPa) desta onda.

(b) O nível de pressão sonora quando duas máquinas A e B operam simultaneamente numa fábrica barulhenta é 87.1 dB (re. 20 μPa). Se B estiver desligado, o nível cai para 83.1 dB. Com B ligado e A desligado, o nível na fábrica é 86.0 dB. Determine o nível gerado por cada máquina e o nível do ruído de fundo.

8. Considere ondas sonoras.

(a) Uma onda sonora progressiva é representada pela equação

$$y = 5 \times 10^{-6} \sin\big(2000\pi t - (\pi x/0.17)\big) \text{ m}$$

t em segundos. Quais são os valores de (i) amplitude, (ii) frequência e (iii) velocidade?

(b) Um outro tipo de onda é representado por

$$y = 10^{-6} \cos(\pi x/0.17) \times \sin(2000\pi t)$$

(i) Explique como essa onda é produzida.

(ii) Mostra como essa equação dá origem à presença de nós e antinós ao longo da onda.

2. Propagação

Introdução

Nesta seção, vamos considerar a propagação do som.

O espalhamento geométrico do som

A intensidade de som I é a potência por unidade de área. Para uma fonte pontual de potência W que irradia igualmente em todas as direções, temos frentes de onda esféricas (de raio r), e

$$I = W/4\pi r^2$$

Exemplo

Qual é a intensidade acústica a uma distância de 10 m de uma fonte pontual de potência 1 W e quais são os valores do nível de intensidade de som, pressão e o nível de pressão?

Solução

$$\begin{aligned} I &= W/4\pi r^2 \\ &= 1.0/4\pi 10^2 = 7.95\times10^{-4}\ \text{W/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_I &= 10\log\left(I/I_0\right) \\ &= 10\log\left(7.95\times10^{-4}/1\times10^{-12}\right) = 89\ \text{dB re } 1\times10^{-12}\ \text{W/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{I\left(\rho c\right)} \\ &= 7.95\times10^{-4}\times420 = 0.578\ \text{Pa} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} L_P &= 20\log\left(p/p_0\right) \\ &= 20\log\left(0.758/2\times10^{-5}\right) = 89\ \text{dB re } 2\times10^{-5}\ \text{Pa} \end{aligned}$$

Agora sabemos que $I \propto 1/r^2$ então

$$(I_2/I_1) = (r_1/r_2)^2$$

Exemplo

Dando que a intensidade do som a uma distância de 10 m da fonte no exemplo anterior é 7.95×10^{-4} W/m^2, qual é a intensidade de som a uma distância de 25 m ?

Solução

$$\begin{aligned} I_2 &= I_1 (r_1/r_2)^2 \\ &= 7.95 \times 10^{-4} (10/25)^2 = 1.27 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Podemos determinar a variação de pressão com a distância da fonte:

Como

$I \propto p^2$ e $I \propto 1/r^2$

temos

$p^2 \propto 1/r^2$ e portanto

$$p \propto 1/r$$

ou

$$(p_2/p_1) = (r_1/r_2)$$

Exemplo

A pressão a uma distância de 10 m de uma fonte é 0.578 Pa. Qual é a pressão a uma distância de 25 m?

Solução

Podemos escrever

$p_2/0.578 = 10/25$ e então $p_2 = 0.23$ Pa

Se L_r é o nível do som a uma distância *r* da fonte, temos

$$L_1 - L_2 = 10\log\frac{I_1}{I_2}$$
$$= 20\log\frac{r_2}{r_1}$$

Assim, a redução no nível de uma fonte pontual será 6 dB com a duplicação da distância:

$$L_r - L_{2r} = 20\log\frac{2r}{r}$$
$$\approx 6 \text{ dB}$$

Finalmente, sabemos que $I = W/4\pi r^2$ e que $I = p^2/\rho c$ portanto

$$p^2/\rho c = W/4\pi r^2$$

ou

$$p = \sqrt{W \times \left(1/r^2\right) \times \left[\rho c/4\pi\right]}$$

Sabemos que

$L_p = 20\log\left(\dfrac{p}{p_0}\right)$ e que $\rho c = 420$ (ar) e então temos

$$L_P = L_W - 20\log r - 11$$

(usando $L_w = 10\log\left(\dfrac{W}{W_0}\right)$)

Também, o nível de pressão a uma distância de r_2 de uma fonte em relação ao nível de pressão a uma distância r_1 da fonte é

$$L_2 = L_1 - 20\log\left(r_2/r_1\right)$$

Exemplo

Determine a SPL a uma distância de 10 m de uma fonte de nível 120 dB.

Solução

$$\begin{aligned} L_P &= L_W - 20\log r - 11 \\ &= 120 - 20\log(10) - 11 = 89 \text{ dB} \end{aligned}$$

Contudo, em geral, por causa de atenuação devido ao solo, atenuação por causa da atmosfera, temos

$$L_2 = L_1 - N\log(r_2/r_1)$$

e N toma conta destes efeitos.

O monópolo, o dipolo e fontes de pistão vibratório

Vamos agora considerar as fontes sonoras que produzem

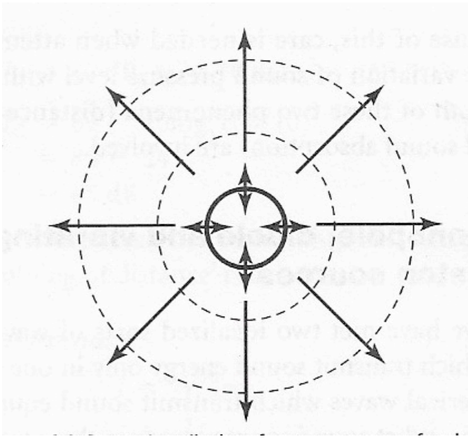
- ondas esféricas,

- ondas planas

e os tipos de ondas produzidas por fontes sonoras reais.

1. Ondas esféricas

Vamos considerar uma superfície esférica que está vibrando radialmente.

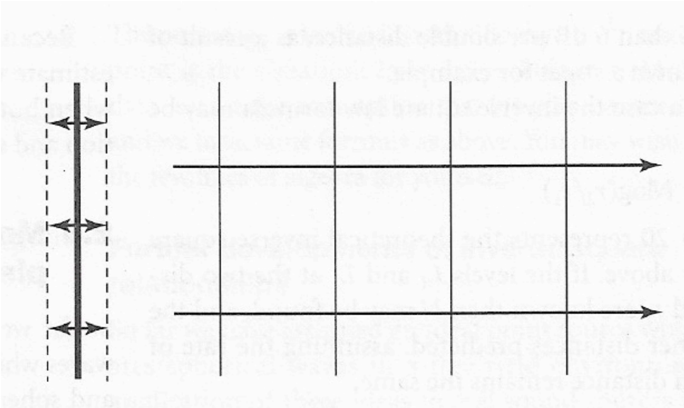


Essa fonte irradiaria ondas esféricas no meio em torno dela e é chamada *monopolo*:

- essa ação resulta em *rarefações* e *compressões* que dão origem a uma onda sonora esfericamente simétrica.

2. Ondas planas

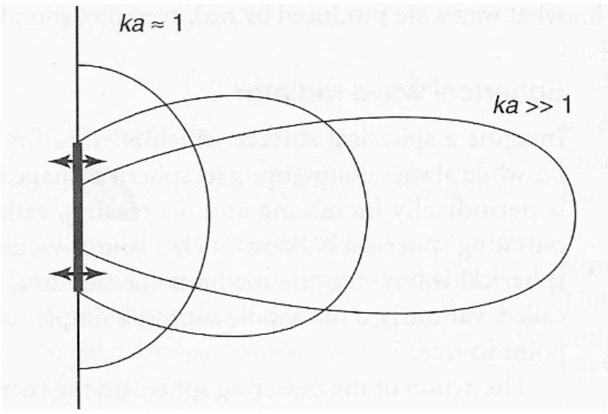
As ondas planas são irradiadas por uma superfície plana vibratória. Cada ponto na superfície atua como uma fonte de ondas esféricas.



Para uma onda plana perfeita, a superfície deve ser de extensão infinita.

3. Fontes reias

Uma fonte que se aproxima de uma fonte real é o pistão de vibração plana:



a é a raio do pistão.

Quando $ka \ll 1$

- o pistão comporta se como um monopolo que irradia ondas esféricas.

Quando $ka \gg 1$

- o pistão irradia ondas planas.

Campos próximos e distantes de fontes sonoras (*Near and far acoustic fields of sound sources*)

Podemos determinar a intensidade do som e o nível de pressão sonora em diferentes distâncias usando:

$$I = W/4\pi r^2$$

e

$$L_P = L_W - 20\log r - 11$$

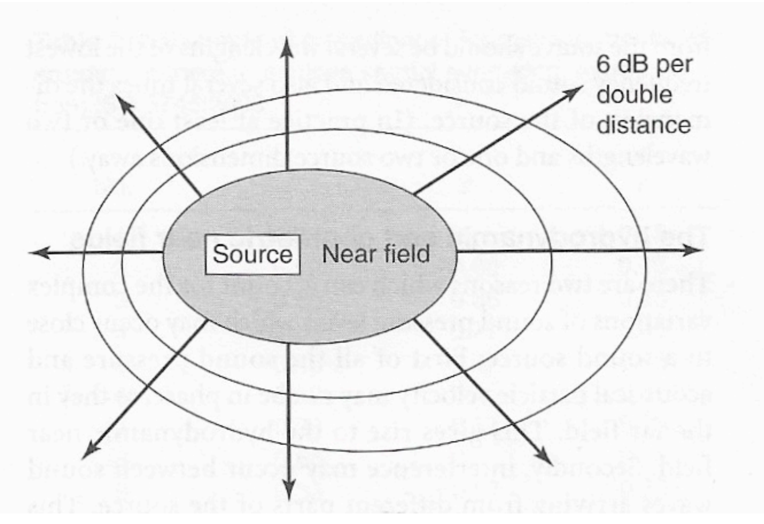
ou

$$I_2 = I_1 \left(r_1/r_2 \right)^2$$

e

$$L_2 = L_1 - 20\log\left(r_2/r_1 \right)$$

mas só podem ser usadas no campo distante (*far field*).



Para estar no campo distante, a distância da fonte deve ser de vários comprimentos de onda.

Diretividade de fontes sonoras

O padrão de diretividade de um monopolo é circular, mas qualquer fonte real será não circular.

A diretividade pode ser quantificada pelo

1. fator de diretividade ou pelo
2. índice de diretividade.

1. fator de diretividade, Q

É definido como

$$\begin{aligned} Q &= I/I_{méd} \\ &= \left(p/p_{méd}\right)^2 \end{aligned}$$

Os valores médios são aqueles que seriam obtidos de uma fonte omnidirecional imaginária que emite a mesma potência sonora.

2. índice de diretividade, D

Isso é expresso em decibéis e é a diferença entre o nível de pressão sonora numa determinada direção medida a uma certa distância da fonte e o nível médio de pressão sonora que seria produzido por uma fonte omnidirecional da mesma potência sonora, ou

$$D = L_\theta - L_{méd}$$

Os dois termos estão simplesmente relacionados:

$$D = 10\log Q$$

ou

$$Q = 10^{D/10}$$

Exemplo

São feitas medições dos níveis de pressão sonora nas posições ao redor de uma broca elétrica numa câmara anecóica. Seis posições de medição são selecionadas, a cada 2 m da broca: quatro no plano horizontal da broca nos pontos da bússola (N, S, E e W) e diretamente acima e abaixo da broca (A e B):

N 80 dB
S 78 dB
E 76 dB
W 82 dB
A 74 dB
B 84 dB

Determine o índice de diretividade em cada direção. Calcule também o nível de potência sonora da máquina.

Solução

Primeiro, temos de calcular a média logarítmica:

$$\begin{aligned} L_{méd} &= 10\log\left[\left(10^{7.4}+10^{7.6}+10^{7.8}+10^{8.0}+10^{8.2}\right)/6\right] \\ &= 80.3 \text{ dB} \end{aligned}$$

Na direção:

N:	D = 80 - 80.3 =	-0.3 dB	$Q = 10^{-0.3/10} =$	0.93
S:		-2.3 dB		0.59
E:		-4.3 dB		0.37
W:		1.7 dB		1.48
A:		-6.3 dB		0.23
B:		3.7 dB		2.3

Para determinar o nível de potência:

$$80.3 = L_W - 20\log(2) - 11 \text{ e}$$
$$L_W = 97.3 \text{ dB re. } 10^{-12} \text{ W}$$

A previsão de níveis sonoros de fontes sonoras reais

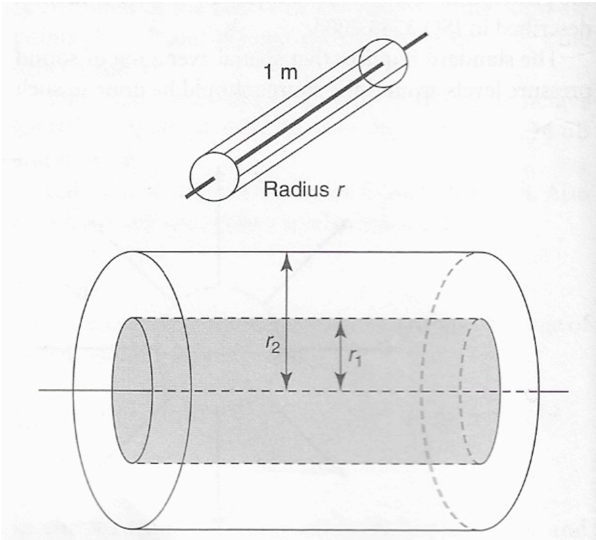
A incorporação do índice de diretividade na equação para o nível de pressão sonora resulta na nova equação

$$L_P = L_W - 20\log r - 11 + D$$

Vamos agora considerar as fontes lineares e planares:

1. A fonte linear

Quando a fonte sonora é uma linha em vez de um ponto, como, por exemplo, uma auto-estrada, o som irradiará na forma de um cilindro:



A variação da intensidade de som e o nível de pressão sonora **por unidade de comprimento** são

$$I = W_L / 2\pi r$$

onde W_L representa a potência sonora por unidade de comprimento, e

$$L_p = L_{WL} - 10\log r - 8$$

onde L_{WL} é o nível de potência sonora por unidade de comprimento.

Assim,

$$\left(I_1/I_2\right)=\left(r_2/r_1\right)$$

e portanto

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= 10\log\frac{I_1}{I_2} \\ &= 10\log\frac{r_2}{r_1} \end{aligned}$$

Se $r_2 = 2\times r_1$

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= 10\log_{10} 2 \\ &\approx 3 \text{ dB} \end{aligned}$$

- a redução será 3 dB com uma duplicação da distância.

Exemplo

Um engenheiro mede o nível de pressão sonora para ser 80 dB a uma distância de 7.5 m da linha de tráfego numa estrada. Qual seria o nível a uma distância de 75 m da linha de tráfego se a leitura foi de
(a) um veículo isolado,
(b) uma linha contínua de veículos idênticos?

Resposta

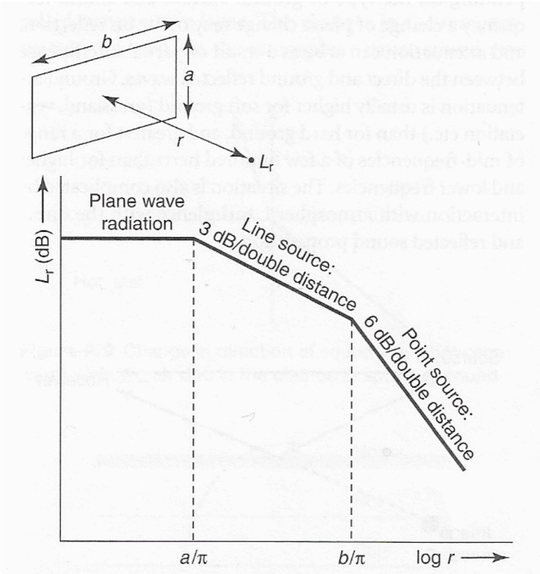
(a) $\Delta L = 20\log\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right) = 20\log\left(\dfrac{75}{7.5}\right) = 20 \text{ dB}$

(b) $\Delta L = 10\log\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right) = 10\log\left(\dfrac{75}{7.5}\right) = 10 \text{ dB}$

2. Fonte Planar

Uma fonte plana, como uma grande abertura na parede de uma fábrica, produz ondas planas nas vizinhanças. A grandes distâncias, as frentes de onda se tornam esféricas e o nível de pressão sonora cai para 6 dB por duplicação de distância:

Rathe determinou a seguinte variação de nível de pressão sonora:



Exemplo

O ruído de dentro de um edifício da fábrica está a ser irradiado através de sua fachada. O nível médio de pressão sonora medido externamente e próximo à fachada, de dimensões 15 m x 4 m, é de 70 dB numa determinada banda de oitava. Determine o nível de pressão sonora nessa banda irradiada da fachada em posições opostas ao centro da fachada, a distâncias de (a) 1 m, (b) 2 m, (c) 4 m, (d) 8 m e (e) 100 m de distância.

Solução

Agora $a = 4/\pi = 1.3$ m e $b = 15/\pi = 4.8$ m . Então

(a) 70 m

(b) $70 - 10\log\left(2/1.3\right) = 68.1$ dB

(c) $70 - 10\log\left(4/1.3\right) = 69.5$ dB

(d) $70 - 10\log\left(4.8/1.3\right) = 64.3$ dB , então $64.3 - 20\log\left(8/4.8\right) = 59.9$ dB

(e) $64.3 - 20\log\left(100/4.8\right) = 37.9$ dB

A propagação de som ao ar livre

Existem vários efeitos que modificam a propagação de som ao ar livre.

- São coletivamente referidos como aspectos de **excesso de atenuação**

Todos esses efeitos são somados num único termo a ser adicionado à equação geral para o nível de pressão sonora:

$$L_p = L_W - 20\log r - 11 + D - A_{excess}$$

Estes podem ser classificados como:

1. *Efeito da absorção de ar*

A absorção do som pelo ar não é considerada muito importante quando comparada aos outros fatores.

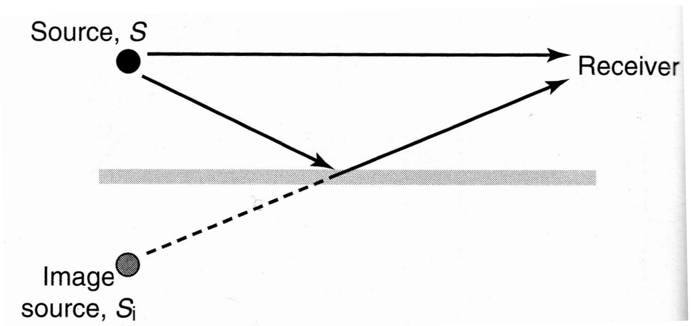
É importante quando se considera a propagação em longas distâncias e em altas frequências. A uma temperatura de 293 K e uma umidade de 50%, a atenuação é

- 0.5 dB / km a 500 Hz

- 1.5 dB / km a 1 kHz

- 6 dB / km a 4kHz.

2. Atenuação devida a propagação perto do solo



Quando a fonte e o microfone estão próximos do solo, há uma interação entre a onda sonora que viaja diretamente da fonte e do microfone e a onda sonora que chega ao microfone após refletir com o solo.

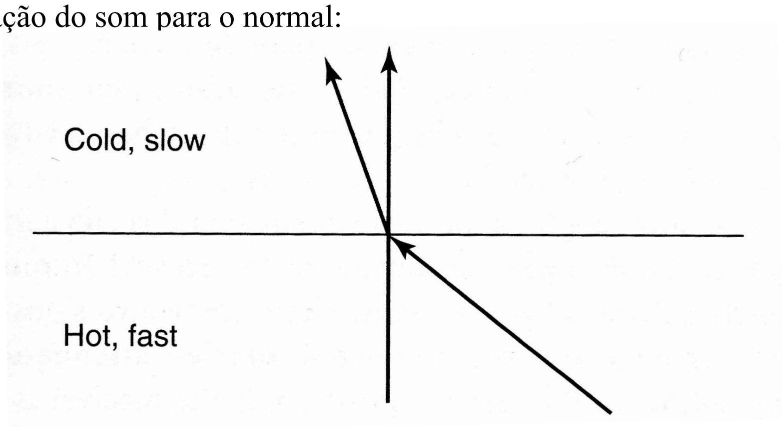
- Haverá interferência entre as ondas refletidas direta e no solo, causando **atenuação**.

3. Refração de som na atmosfera

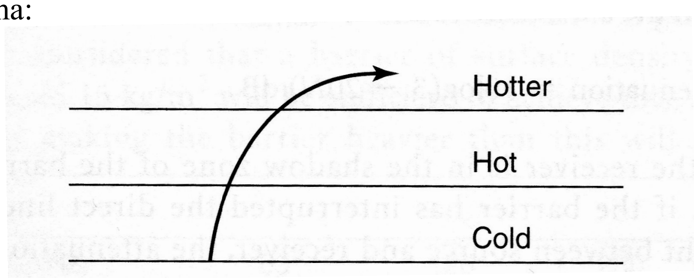
Refração é a mudança de direção de uma onda sonora que ocorre quando o som se move de um meio para outro meio com uma velocidade sonora diferente.

Efeito de gradiente de temperatura:

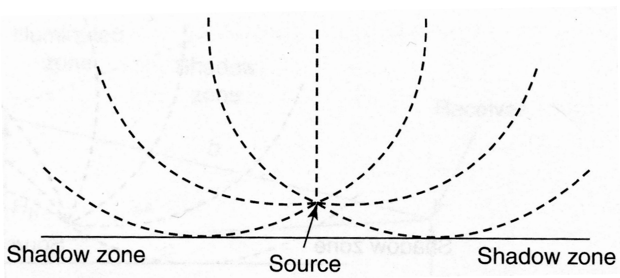
Quando o som viaja de um meio para outro com uma velocidade de som mais baixa, há refração do som para o normal:



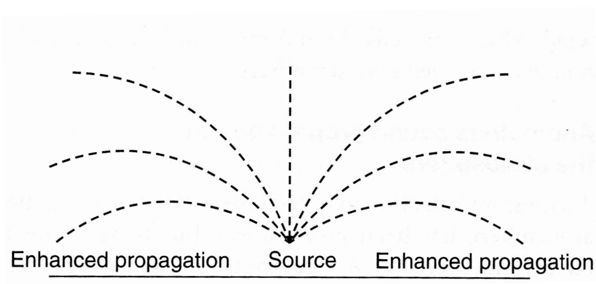
Com uma mudança gradual da temperatura com a altura na atmosfera, as ondas sonoras têm a forma:



Durante o dia:

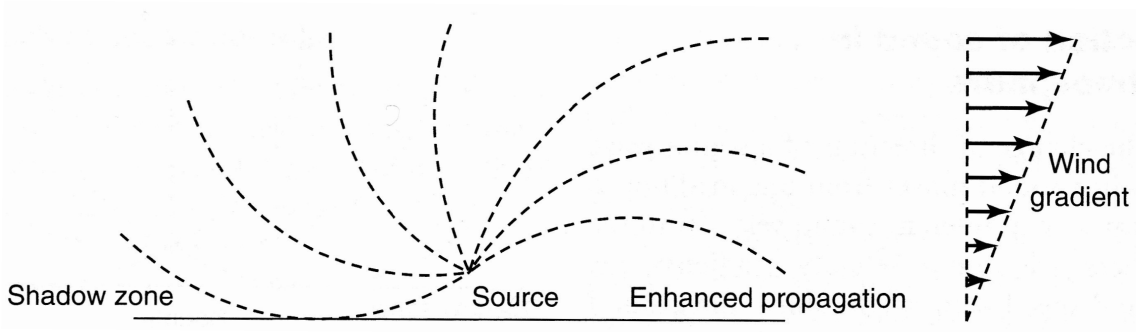


Durante a noite:



Durante a noite, ocorrem inversões de temperatura e os raios desviam-se na direção ao solo. A grandes distâncias, o efeito pode causar variações no nível de som de ~ 20 dB.

Efeito de gradiente de velocidade:

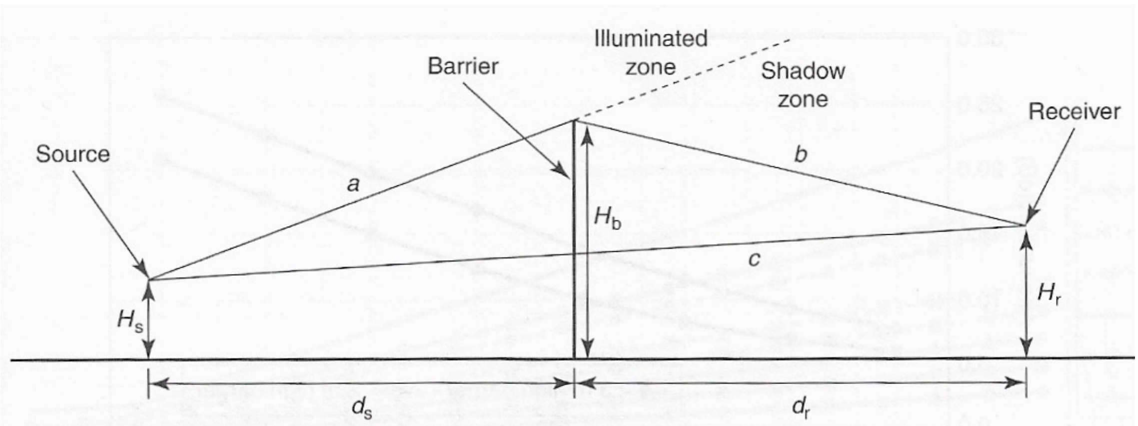


4. Barreiras

A redução (ou atenuação) do nível de som usando uma barreira (por exemplo, uma parede) é eficaz somente quando a barreira é grande em comparação com o comprimento da onda do som.

Qualquer som que chega ao ouvinte é devido à difração na parte superior e ao redor dos lados da barreira e a atenuação pode ser determinada usando o método de **Maekawa**.

Vamos considerar a diferença de caminho, δ , ou seja, o caminho sonoro adicional para os raios que passam sobre uma barreira simples:



$$\delta = (a+b) - c$$

e também vamos determinar o número de Fresnel

$$N = 2\delta/\lambda$$

onde λ é o comprimento de onda.

Agora, a atenuação depende da posição do receptor:

1. Com o receptor na **zona iluminada**

$$\text{Atenuação} = 10\log\left(3 - 20N\right) \text{ dB}$$

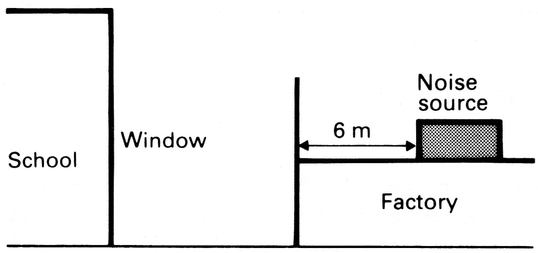
2. Com o receptor na **zona de sombra**

$$\text{Atenuação} = 10\log\left(3 + 20N\right) \text{ dB}$$

Se a posição do receptor estiver na linha de visão, temos $N = 0$ e
$\text{Atenuação} = 10\log\left(3\right) \approx 5 \text{ dB}$

Exemplo

Uma escola está localizada 9 m de uma fábrica de móveis com um teto plano com um aparelho de ar condicionado. A janela mais alta na escola virada para a fábrica está à mesma altura como a fonte de ruído (1 m acima do telhado de fábrica). O aparelho produz um ruído com frequência de 660 Hz. Determine a atenuação devida a uma parede de 4 m de altura.



Solução

Do diagrama

$$a = \left[9^2 + \left(4-1\right)^2\right]^{1/2} = 10 \text{ m}, \quad b = \left[6^2 + \left(4-1\right)^2\right]^{1/2} = 6.7 \text{ m}, \quad c = 15 \text{ m} \text{ e então}$$

$$\delta = \left(a+b\right) - c = \left(10 + 6.7\right) - 15 = 1.7 \text{ m}$$

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\times 1.7}{0.5} = 6.8$$

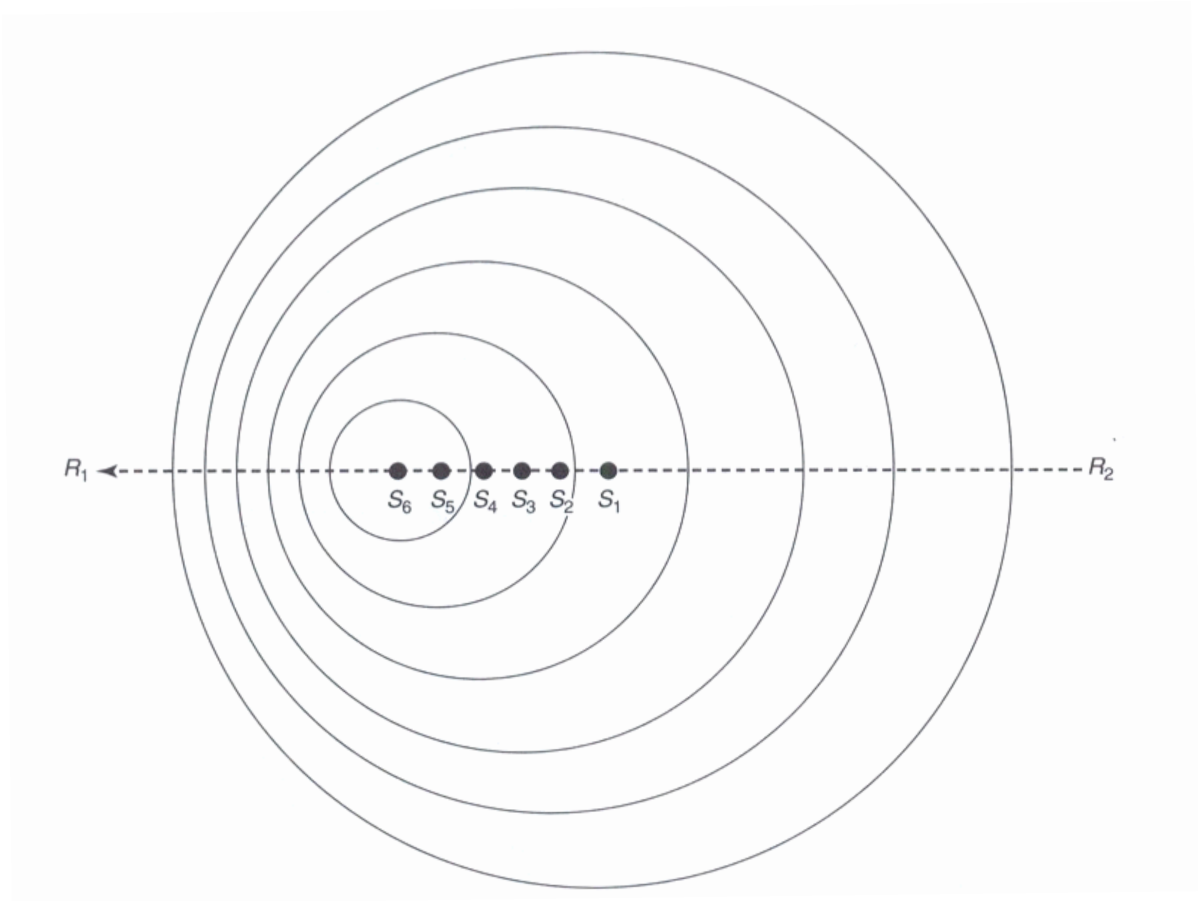
e

$$\text{Atenuação} = 10\log\left(3 + 20N\right) = 10\log\left(3 + 20\times 6.8\right) = 21.4 \text{ dB}$$

Nestes cálculos, é essencial que a barreira em si não transmita som - lacunas na barreira tornariam-na inútil como uma barreira de som.

Efeito de Doppler

Suponha que uma fonte sonora em movimento para um observador emite um som de frequência *f*, há uma redução no comprimento de onda:



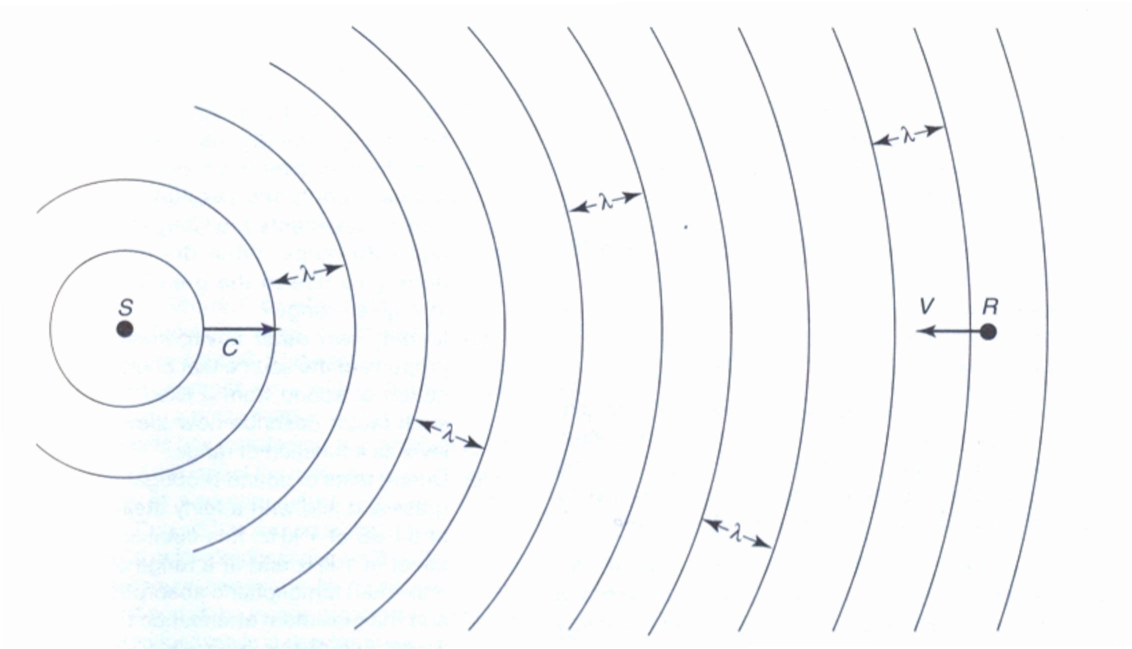
Agora como

$$\lambda' = c(1/f) - v_f(1/f)$$

a frequência aparente recebida pelo observador é

$$\begin{aligned} f' &= c/\lambda' \\ &= c/\left[(c - v_f)(1/f)\right] \\ &= \left[c/(c - v_f)\right] f \end{aligned}$$

Para o caso onde o observador está em movimento para a fonte:



não há mudança no comprimento de onda mas a velocidade efetiva do som aumenta de c para $(c+v_o)$ e então

$$c/f = (c+v_o)/f'$$

e assim

$$f' == [(c-v_o)/c]f$$

Combinando os dois resultados

$$f' == [(c+v_o)/(c-v_f)]f$$

Exemplo:

Um morcego que está a voar a uma velocidade de 10 m/s, em direção a uma parede estacionária, emite um som ultra-sónico de 100 kHz (velocidade de som, c = 343 m/s).

(a) Calcule a frequência com que a onde incide na parede e o comprimento de onda na região frontal ao morcego.

(b) Uma vez que o som é reflectido pela parede, esta actua como uma fonte de ondas, cuja frequência é a calculada em (a). Com que frequência o morcego ouve o som reflectido pela parede?

Solução:

(a) A fonte é o morcego que emite ondas de $f = 100\text{ kHz}$. A fonte move-se a velocidade $v_f = 10\text{ m/s}$. Então

$$f' = 100000\left(\frac{343+0}{343-10}\right) = 103003.0\text{ Hz}$$

O comprimento dessa onda é $\lambda = c/f' = 343/103003 = 3.3\times10^{-3}\text{ m}$

(b) Nesse caso, a fonte é a parede e emite ondas de $f = 103003\text{ Hz}$. O morcego é o receptor que se move a uma velocidade $v_o = 10\text{ m/s}$. Assim

$$f' = 103003\left(\frac{343+10}{343-0}\right) = 106000.0\text{ Hz}$$

Problemas

1. O nível de ruído de uma máquina de costura é 96 dB a uma distância de 1 m. Qual é a potência de som da máquina em picowatts?

2. Um farol tem uma sirene com uma potência de som de 100 w. Se irradia sobre um quarto de uma esfera, a que distância o nível seria 100 dB? Porque é que uma sirene de baixa frequência seria melhor do que uma sirene de alta frequência?

3. Qual é a potência da voz de uma mulher que produz um nível de pressão sonora de 80 dB a uma distância de 1 m?

4. Os níveis de ruído às distâncias de 10 m e 20 m de uma máquina foram 77 dB e 68 dB, respectivamente. Qual é o nível de ruído a 120 metros da máquina?

5. Considere uma barreira para a redução da transmissão de som.

(a) Mostre que a teoria de Makaewa para a atenuação oferecida por uma barreira fina e infinitamente longa leva à conclusão de que um ouvinte colocado a uma altura que uma fonte possa ser vista acima dessa barreira se beneficiará de alguma atenuação. Quanta atenuação será alcançada?

(b) Uma fina barreira parcial na forma de um retângulo vertical medindo 6 m (comprimento) x 4 m (alto) é colocada simetricamente entre uma fonte de frequência 500 Hz e um microfone, cada um com altura 2 m acima do solo e a uma distância de 5 m da barreira. Calcule a atenuação oferecida pela barreira.

6. Determine a redução do nível de pressão sonora a 165 Hz por uma barreira de altura 4 m ao lado de uma auto-estrada, se a fonte de ruído é de 500 mm acima da base da barreira e a uma distancia de 5 m dela. O observador é 1 m abaixo da base e a uma distancia de 10 m dela.

7. Considere a propagação de som de um gerador de som.

(a) Descreva os principais fatores que devem ser levados em consideração ao determinar a atenuação do ruído com a distância de uma fonte de ruído. Indique quais desses fatores são significativos apenas próximos à fonte e quais são significativos apenas a distâncias maiores.

(b) Um gerador portátil de nível de potência sonora 95 dBA está localizado no chão, perto de uma grande parede refletora. Qual o nível de ruído esperado a 1 m da fachada de uma casa, a 75 m da posição do gerador?

(c) Se uma barreira de ruído for interposta entre o gerador e a casa, de modo que o topo da barreira esteja na linha de visão entre o gerador e a posição de monitoramento na casa, que redução de nível de ruído na casa seria esperada?

8. Considere o efeito de Doppler.

(a) Deduza uma expressão que relaciona a frequência observada de um sinal de uma fonte em movimento por um observador estacionário com a frequência real.
(b) Um disco rotativo tem um sinal associado ao seu perímetro. O diâmetro do disco 1 m e roda com uma frequência de 2 Hz. Qual é a razão da frequência máxima para a mínima recebida por um observador estacionário situado além, mas no plano do disco?

3. A resposta humana a ruído

Introdução

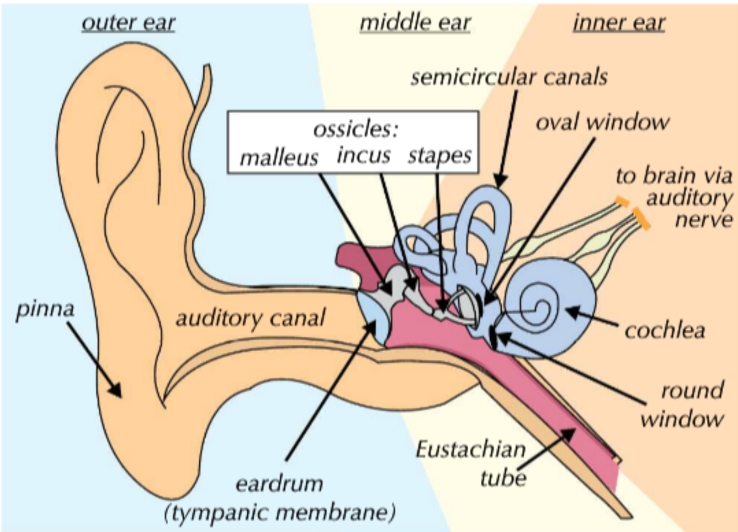
Nesta seção, analisamos os efeitos subjetivos do ruído e sua causa

O Ouvido

O ouvido humano converte:

fraco estímulo mecânico → estímulos nervosos

Tem três partes:



(1) Ouvido externo:

- parte do ouvido que está em contacto com o meio externo

- consiste de:
  um canal auditivo (0.7x2.5 cm)
  um pavilhão externo

- termina na membrana timpânica:

(2) Ouvido médio:

- a membrana timpânica é o início do ouvido médio
- é uma cavidade cheia de ar (2 cm^3 de volume).
- contêm três pequenos ossos:

1. martelo
2. bigorna
3. estribo

- limitada internamente pelas janelas oval e redonda

- parte interior: aberta da trompa de Eustáquio

Em adultos, em média a área do tímpano e da janela oval é 0.55 cm^2 e 0.032 cm^2, respectivamente. Se um estímulo sonoro exercer sobre o tímpano uma força F_t, o sistema de ossículos dá um ganho a essa força de uma maneira tal que a força na janela oval será

$$F_{jo} = 1.3 F_t$$

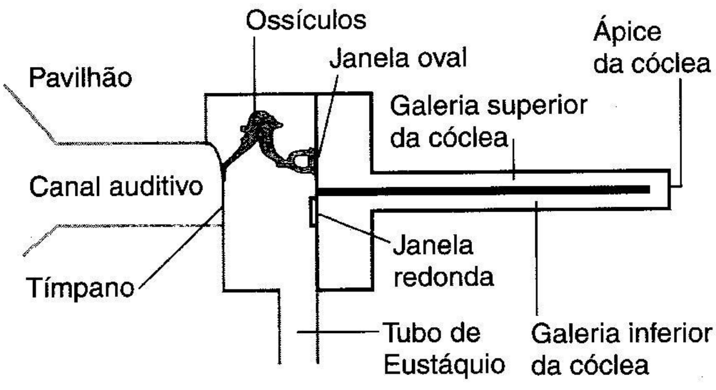
Logo, as pressões experimentadas pela janela oval e o tímpano satisfazem a relação

$$P_{jo} \approx 22 P_t \, .$$

(3) Ouvido interno:

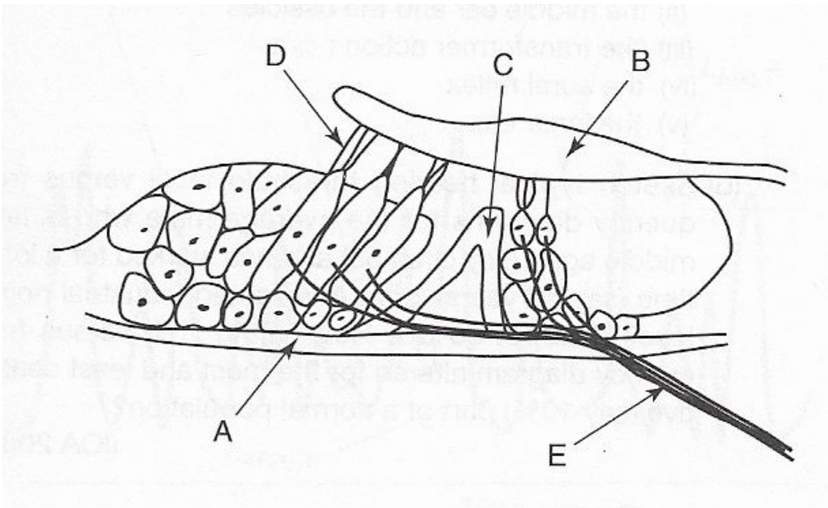
- A energia transportada pelo estimulo sonoro será convertida num sinal eléctrico até o córtex auditivo.

- Contem a cóclea cujas paredes limitam três tubos enrolados em espiral. Se a imaginarmos desenrolada, os três tubos cocleares têm disposição paralela:



- A galeria superior da cóclea comunica-se com o ouvido médio através da janela oval e galeria inferior da cóclea comunica-se com o ouvido médio através da janela redonda. Essas duas rampas comunicam-se pelo helicotrema localizado no ápice da cóclea e são separadas pela membrana basilar.

- A membrana basilar tem 35 mm de comprimento e aumenta de 2 mm a 3 mm de largura. Dentro da cóclea é a orgão de Corti que contém líquido e o movimento da janela oval causa um aumento de pressão na galeria superior, que empurra a membrana basilar. A membrana basilar contém cílios que se movem com o fluido. Na base destas cílios estão as células nervosas que detectam o movimento e geram sinais elétricos para transmissão ao cérebro:



A - Membrana basilar
B - Membrana tectorial
C - Arca de Corti
D - Cílios
E - Neurônio auditório.

Cada parte da membrana responde de maneira diferente a diferentes frequências, o que nos permite ouvir diferentes frequências:

Dependo da frequência da onda sonora, a máxima deflexão da membrana basilar acontecerá em diferentes regiões da membrana

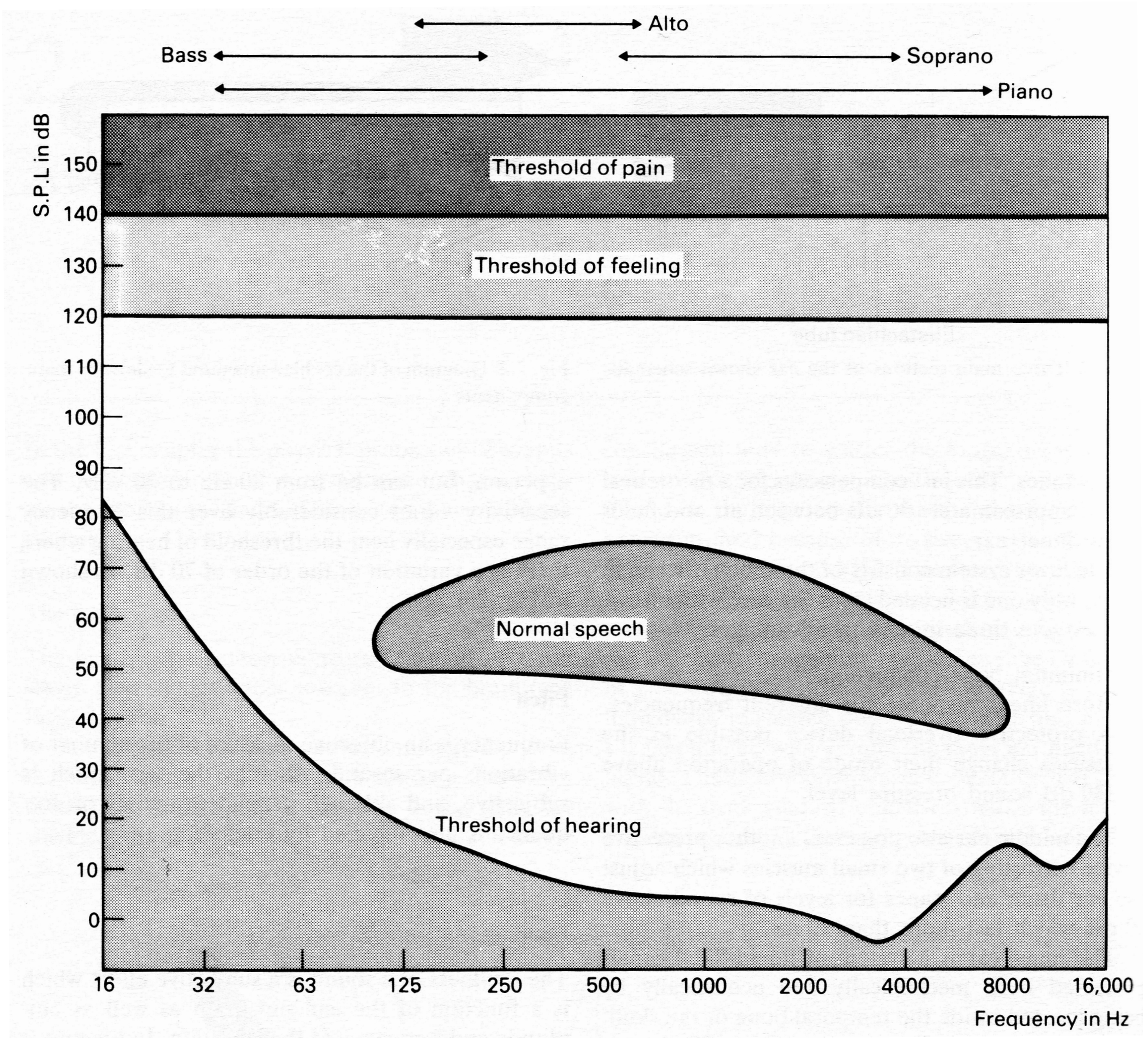
- perto da janela oval para frequências altas
- perto do helicotrema para frequências baixas.

Aspetos de audição

As frequências audíveis estão no intervalo de

20 Hz - 20 kHz.

A sensibilidade do ouvido varia muito com a frequência da onda sonora, criando-se, assim, um *campo de audibilidade*:



Quando num valor de frequência audível, fazemos crescer a intensidade de um som, constatamos que

- a partir de um certo valor do SPL, começamos a perceber som;

- além de um valor bem superior da pressão acústica denominada limiar doloroso, o som provoca uma sensação penosa e até mesmo insuportável.

Da análise da curva de audibilidade, concluímos que o ouvido

- não percebe com a mesma intensidade sons de frequências diferences;

- é sensível sobretudo a frequências médias (500 Hz - 5 kHz) visto que, para igual intensidade, a intensidade fisiológica é a maior nesse intervalo.

- tem a capacidade de perceber vibrações que apresentam pequenas diferenças de frequências; isso acontece no denominado limiar diferencial;

- é pouco sensível a sons com frequências que se situam nos extremos do campo de audibilidade.

Os sons distinguem-se de outro pelas seguintes qualidades fisiológicas

- a altura, que está ligada unicamente à frequência da onda sonora

- a timbre, que depende dos harmónicos associados ao som fundamental

- a intensidade, que está ligada à amplitude das vibrações.

Cálculo do valor de dBA a partir dos níveis de pressão sonora

Considere a tabela:

Octave band frequency	Octave band SPL	A-weighting	A-weighted SPL
63	103	−26	77
125	96	−16	80
250	89	−9	80
500	82	−3	79
1000	84	0	84
2000	79	+1	80
4000	73	+1	74
8000	69	−1	68

O nível com ponderação-A é dado por

$$L_A = 10\log\left[10^{7.7} + 10^{8.0} + 10^{8.0} + 10^{7.9} + 10^{8.4} + 10^{8.0} + 10^{7.4} + 10^{6.8}\right]$$
$$= 88.5 \text{ dBA}$$

Audiometria

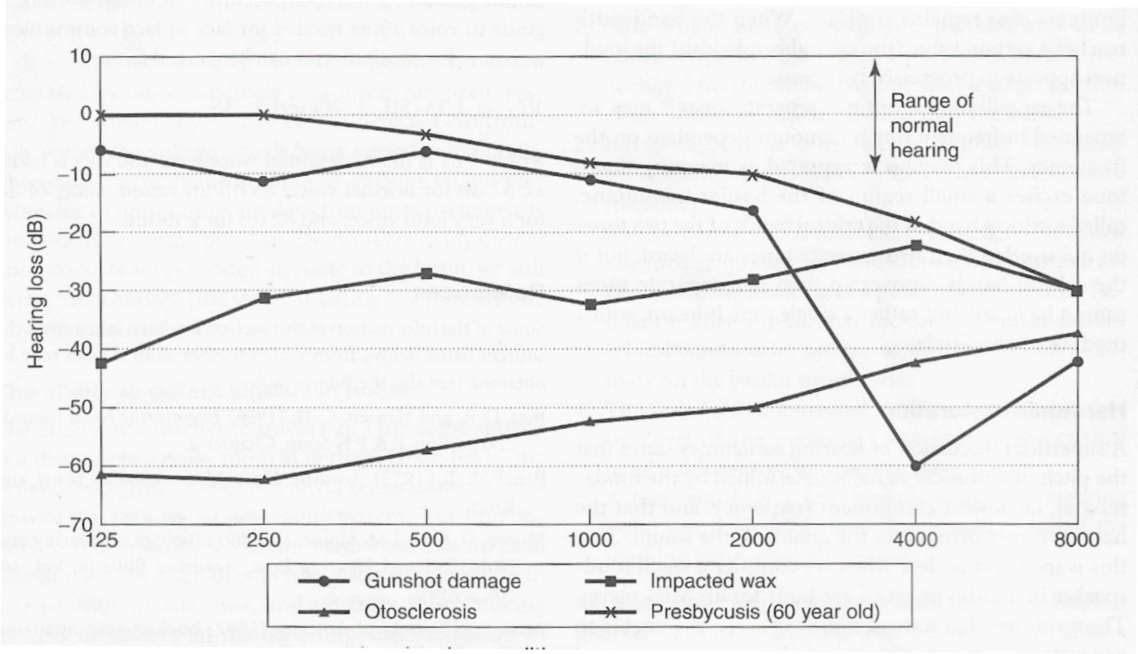
Audiometria é o termo usado para descrever a medida da sensibilidade auditiva.

O instrumento utilizado para esta finalidade é um audiômetro, que produz tons puros de várias frequências em níveis diferentes de pressão conhecida.

A pessoa tem que dizer, para cada orelha, qual nível em cada frequência, que ele possa detectar.

A linha zero, chamada zero audiométrico, é o limiar da audição

A data é apresentada como na figura:



Tipos e fontes de perda auditiva

Há dois tipos de defeitos de audição:

Ver: *https://www.hear-it.org/Impressions-of-hearing-loss-and-Tinnitus-*

1. Defeitos que não são o resultado da exposição ao ruído

(a) Perda auditiva condutiva (conductive hearing loss)

É o resultado de defeitos nas partes condutivas do mecanismo do ouvido - o ouvido externo e o ouvido médio:

- cera no canal auditivo;
- otosclerose;
- inflamação no ouvido médio;
- tímpano perfurado.

O efeito dessa perda é uma atenuação semelhante em toda a faixa de frequência.

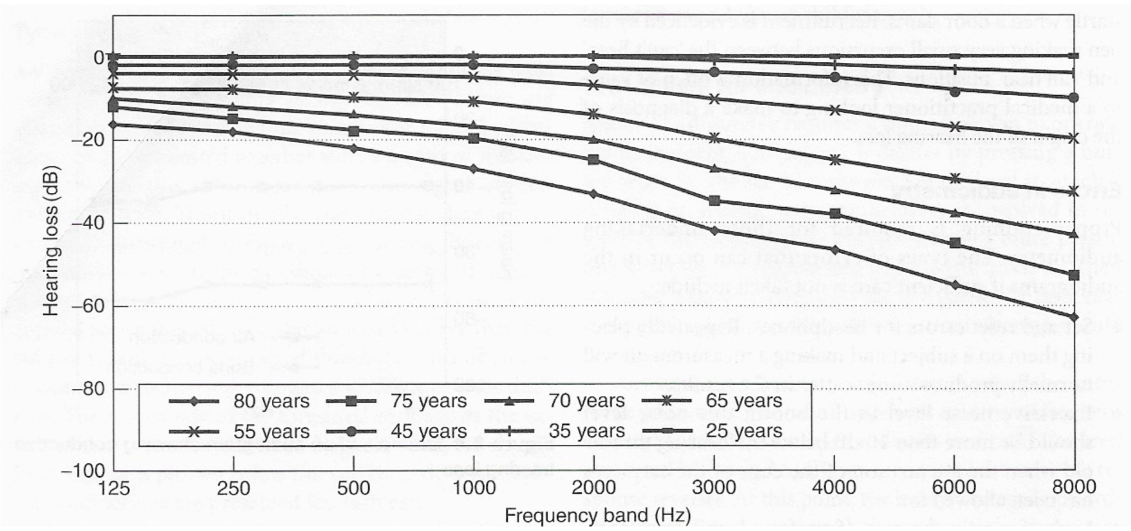
Como o ouvido interno ainda está funcionando, pode-se aplicar tratamento médico

(b) Perda de audição neurosensorial (Sensorineural hearing loss)

- Associado a danos no ouvido interno e varia em todo o espectro de frequências.

- *Presbiacusia*

A perda de audição associada com a idade.



- *Zumbido*

- Geralmente sob a forma de um som de alta frequência nos ouvidos.

2. Defeitos que sejam directamente atribuíveis a danos causados pelo ruído.

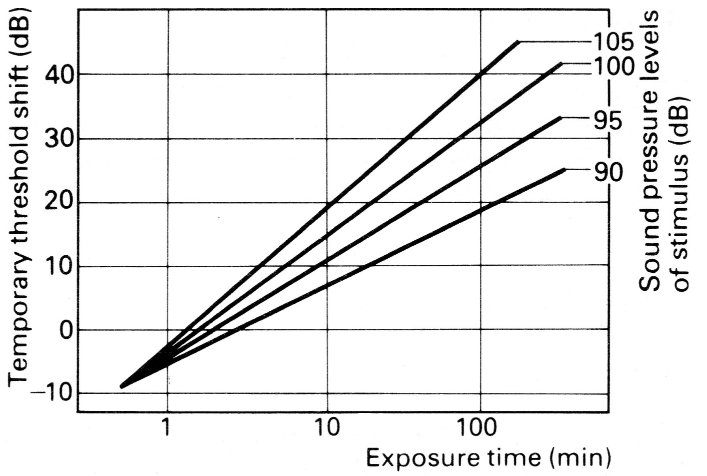
(a) *Mudança temporária de limiar auditivo*

Quando uma pessoa com audição normal é exposta a ruído intenso por algumas horas, ele sofre uma perda temporária de audição - a mudança temporária de limiar auditivo (temporary threshold shift, TTS)

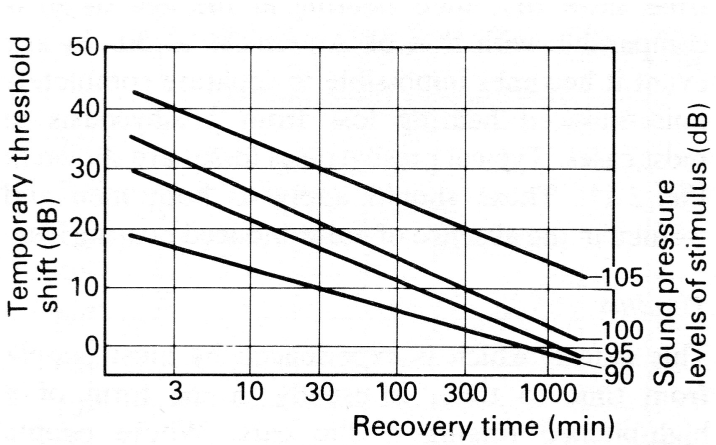
- levantou-se o limiar da sua audição no intervalo 4 - 6 kHz.

A quantidade de TTS depende do tempo de exposição.

TTS à frequência 4 kHz após a exposição ao ruído na oitava faixa 1.2-2.4 kHz:

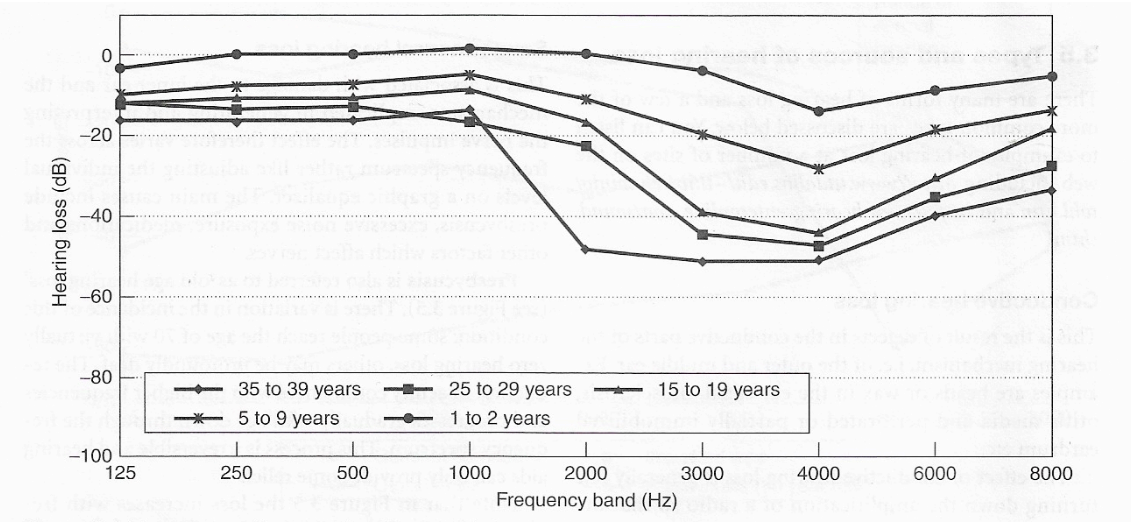


Após um tempo suficientemente longo de ruído, ele geralmente se recupera (mesmos valores):



(b) *Mudança permanente de limiar auditivo*

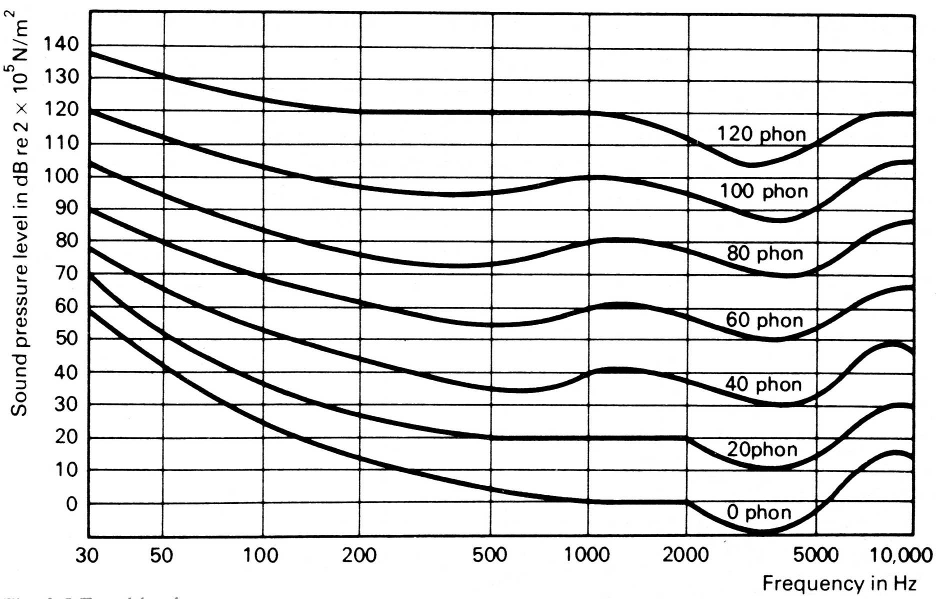
Para uma pessoa exposta ao ruído ocupacional intenso durante o dia de trabalho durante anos, ele sofre mudança permanente de limiar (Permanent threshold shift, (PTS):



Avaliação da sonoridade do som

Vamos considerar uma pessoa com audição normal e correlacionar a magnitude e a frequência com a sonoridade ou o volume (loudness).

Tons puros de frequências diferentes são comparados com o de 1000 Hz ajustando a magnitude para obter curvas de igual sonoridade:



Embora o uso da ponderação A seja adequado para indicar a sonoridade aproximada dos sons, há situações em que são necessárias estimativas mais precisas da sonoridade. Usamos

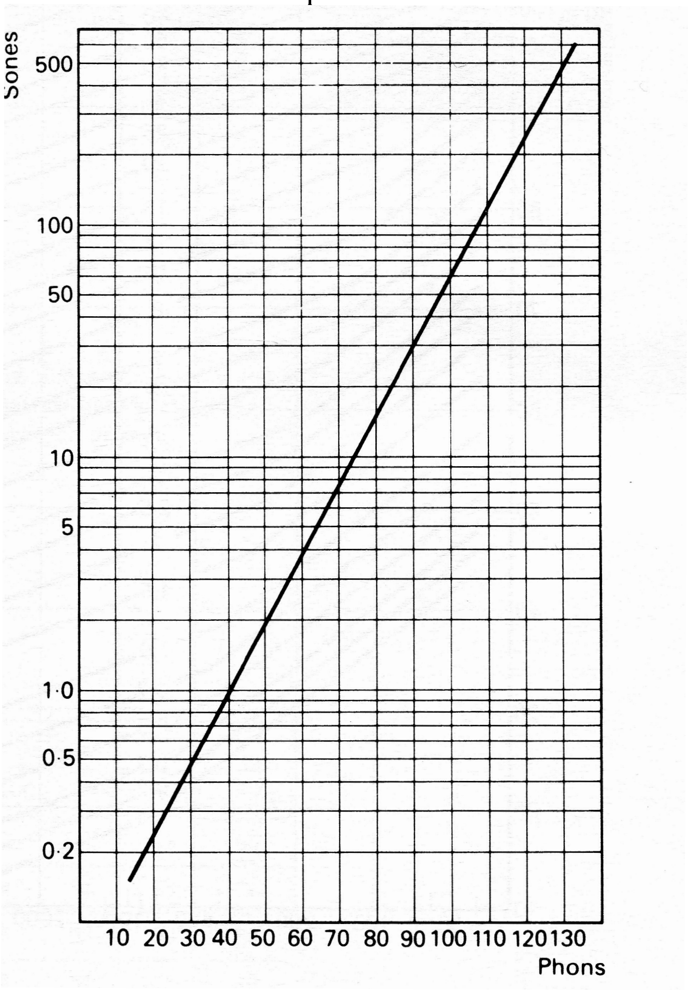
- a escala **Phon** (as vezes, a escala de nível de sonoridade - *loudness level scale*)
A escala é baseada nos contornos de igual sonoridade.

e

- a escala **Sone**

A escala **Sone** foi desenvolvida para fornecer uma medida de volume que não está em decibéis. Os valores de sones podem ser adicionados aritmeticamente para obter níveis de sonoridade.

Há uma relação simples entre Sones e Phons:



$$\text{Sones} = 2^{(\text{Phons}-40)/10}$$

e

$$\text{Phons} = 40 + 33\log(\text{Sones})$$

Os contornos de igual sonoridade aplicam-se apenas a tons puros.

Como estimamos a sonoridade de sons de banda larga e mais complexos?

- O método baseia-se na teoria de que o cérebro atribui uma sonoridade a cada componente da banda de frequência e, em seguida, combina-os de alguma maneira para obter uma sensação da sonoridade do som como um todo.

Para simular este processo, é necessário

1. desenvolver um método para estimar uma sonoridade parcial para cada faixa de frequência

2. desenvolver um método para combiná-los numa estimativa geral da sonoridade total.

Aqui, vamos usar o método de **Stevens**:

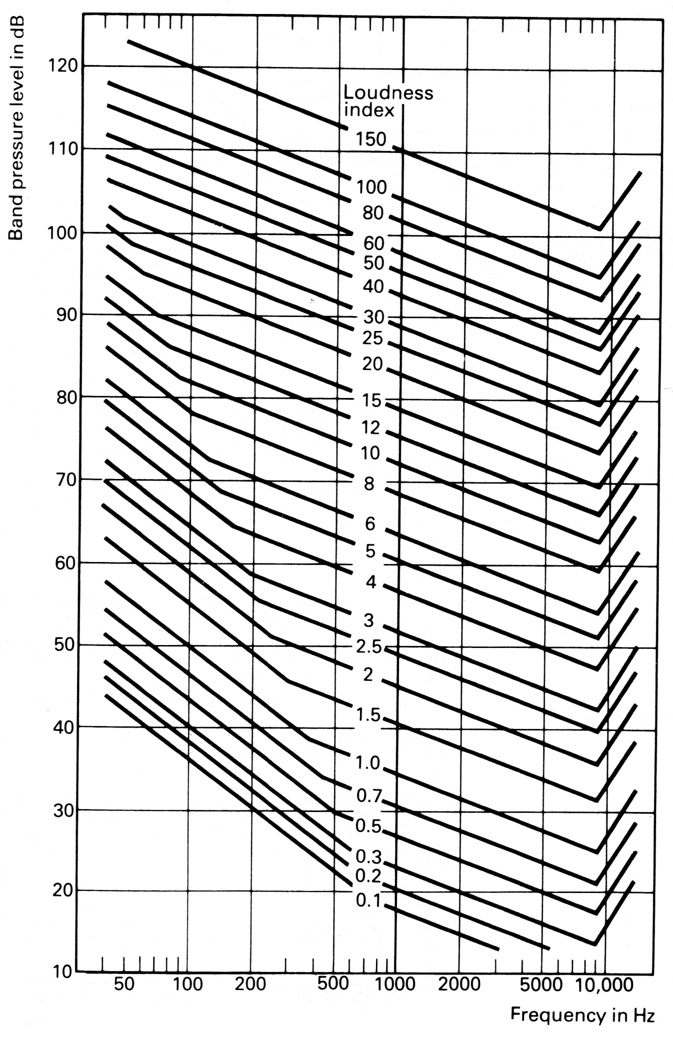
Passo 1: Use as curvas da figura para determinar o valor Sone para cada banda de oitava (S_i) e identifique o maior desses valores ($S_{i,\max}$)

Passo 2: Combine os valores individuais de Sone no valor total de Sone usando:

$$S_{tot} = S_{i,\max} + 0.3\left(\left(\sum S_i\right) - S_{i,\max}\right)$$

Passo 3: Converta o valor total de Sone em Phons usando

$$\text{Phons} = 40 + 33\log\left(\text{Sones}\right)$$



Exemplo

Um carro produz os seguintes níveis de ruído:

Frequência central de banda de oitava (Hz)	Nível (dB)
63	95
125	84
250	80
500	68
1000	65
2000	61
4000	60
8000	60

Determine o nível em phons.

Solução

Primeiro, determinamos os níveis em Sones usando a figura:

Frequência central de banda de oitava (Hz)	Nível (dB)	Nível (Sones)
63	95	20
125	84	12
250	80	11
500	68	7
1000	65	6
2000	61	6.5
4000	60	7
8000	60	8
		$\sum S = 77.5$

Assim,

$$\begin{aligned} S_{tot} &= S_{i,\max} + 0.3\left(\left(\sum S_i\right) - S_{i,\max}\right) \\ &= 20 + 0.3(77.5 - 20) = 37.25 \text{ Sones} \end{aligned}$$

e o nível de sonoridade é 92 Phons.

TABLE 2.1 *Loudness of common noises*

Noise	*Sones*	*Phons*
Large jet plane 80 m overhead	700	134
Heavy road traffic at kerbside	79	103
Light road traffic at kerbside	16	80
Students' refectory	20	84
Normal speech (male) at 1 m	11	75
Inside noisy motor car	40	94
Machine shop	97	106

Ruído, o Noy e PNdB

Na percepção do público, entende-se que o barulho carrega conotações não apenas da

sonoridade,

mas também de

intrusões ou perturbações.

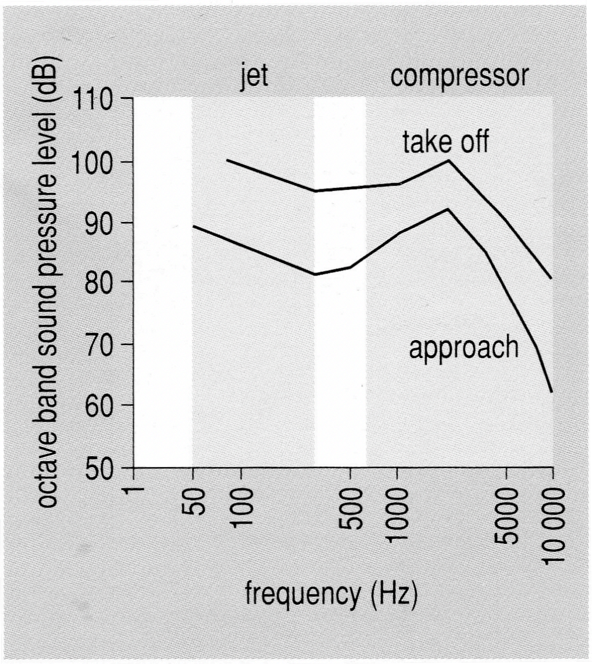
- O barulho de uma serra circular é mais irritante do que de um autocarro, mesmo que eles podem ter a mesma sonoridade.

A sonoridade de um som é a impressão auditiva do som, enquanto que a irritação de um som é a sensação de descontentamento do som.

Vamos considerar a irritação com o ruído de aviões.

- há uma proporção significativa da potência sonora total concentrada nas frequências superiores a 1000 Hz.

Geralmente, as frequências acima de 1000 Hz são julgadas para ser mais irritante do que frequências abaixo de 1000 Hz.



Vamos determinar o nível de ruído percebido (Perceived noise level, PNdB) de um ruído específico usando a mesma abordagem considerada no cálculo da sonoridade:

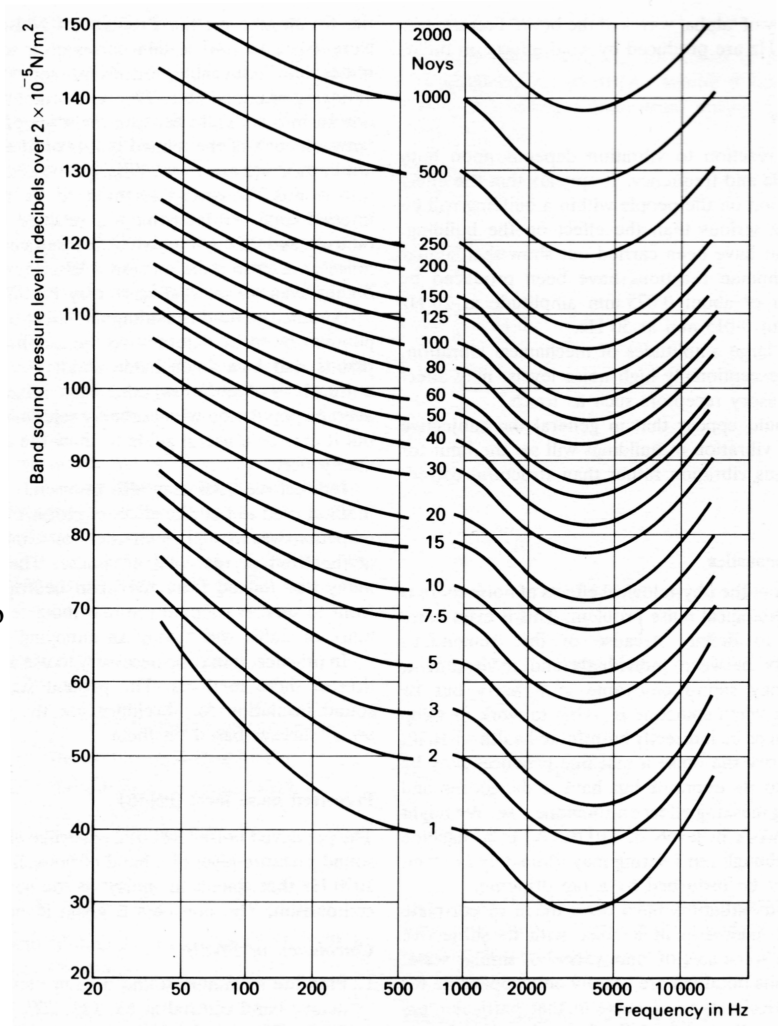
Passo 1: Use as curvas da figura para determinar o valor Noy para cada banda de oitava (N_i) e identifique o maior desses valores ($N_{i,\max}$)

Passo 2: Combine os valores individuais de Noy no valor total de Noy usando:

$$N_{tot} = N_{i,\max} + 0.3\left(\left(\sum N_i\right) - N_{i,\max}\right)$$

Passo 3: Converta o valor total de Noys no Nível de Ruído Percebido (*perceive noise level*) L_{PN} em PNdB usando

$$L_{PN} = 40 + 33\log\left(\text{Noys}\right)$$



Exemplo

Determine o nível de ruído de um som em Noys e PNdB:

Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
x (dB)	82	75	64	60	69	58	56	45
N_i	7.5	7.5	4.5 5	4 5	7.5 6	6.5	6.5 5	2

Solução

$N_m = 7.5$ e assim

$$N_t = N_m + 0.3 \times \left(\sum_{n=1,8} N - N_m \right) = 7.5 + 0.3 \times 44.5$$

$$= 19 \text{ Noys} = 83 \text{ PNdB}$$

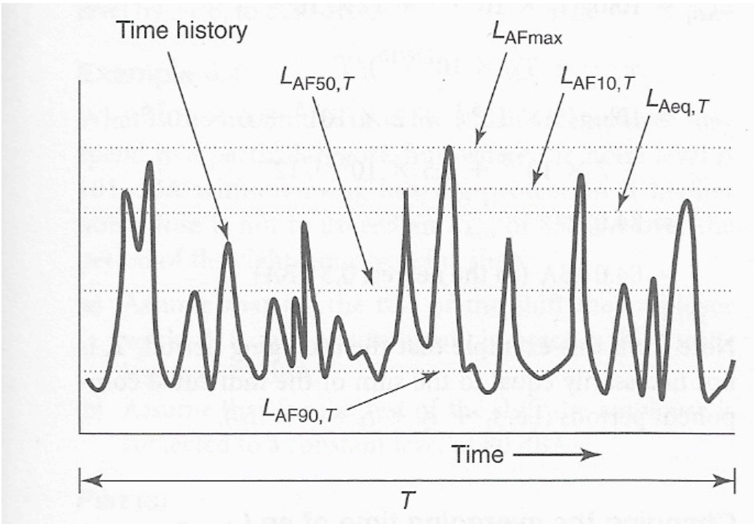
Ruído ambiental

A maior parte do ruído, seja no ambiente ou no local de trabalho, varia com o tempo. Aqui, vamos considerar como o ruído variável no tempo pode ser

- descrito e
- medido usando o parâmetro $L_{\mathrm{A}eq}$.

O risco de danos auditivos é pequeno se uma pessoa não seja exposta a mais de 90 dB (A) durante uma semana no trabalho.

No entanto, há uma variação considerável no nível de som durante a semana:



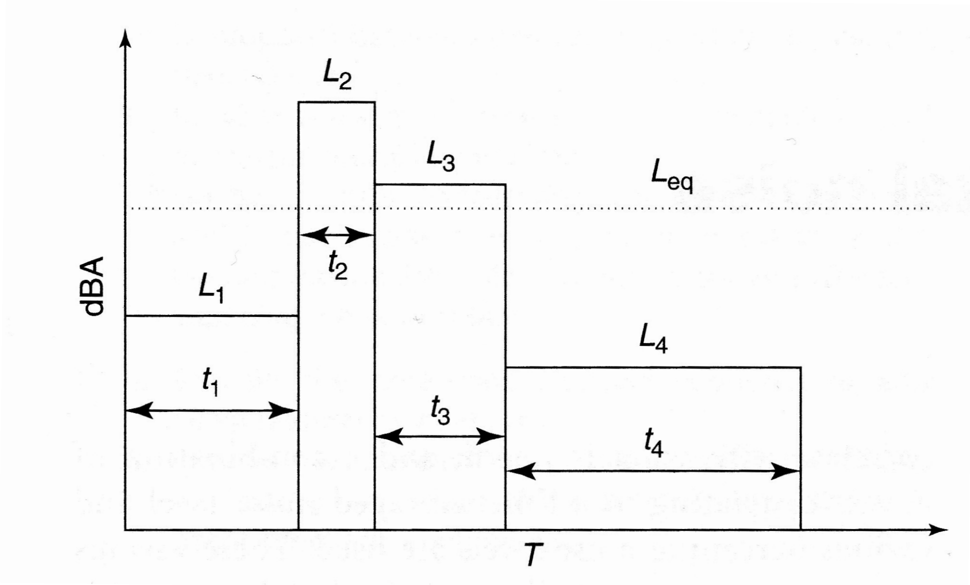
O nível do percentil de ruído estatístico, $L_{AFN,T}$ é o nível de ruído em dBA que é excedido em N% do intervalo de medição.

O nível sonoro contínuo equivalente (*continuous equivalent noise level*), $L_{\mathrm{Aeq},\,T}$ é o nível sonoro de um som que tem, ao longo de um período determinado T (normalmente 40 horas), a mesma energia (de ponderação-A) que o ruído em questão.

Para uma variação simples consistindo em diferentes níveis de ruído para diferentes períodos de ruído, o valor de $L_{\mathrm{Aeq},\,T}$ pode ser calculado a partir dos níveis e peródos de tempo:

$$L_{\mathrm{Aeq},T} = 10\log\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N} t_i \times 10^{L_i/10}\right]$$

onde t_i é a duração do nível de ruído L_i em dB(A)



Com efeito, $L_{\mathrm{Aeq},\,T}$ é um tipo de nível médio de ruído durante o período de medição. É amplamente utilizado para medir e avaliar os níveis de exposição ao ruído

- no local de trabalho e
- para o ruído ambiental.

Exemplo

Determine o nível sonoro contínuo equivalente para ruídos de 85 dB(A) que dura 30 horas, 95 dBA que dura 9 horas e 100 dBA que dura 1 hora durante uma semana de 40 horas.

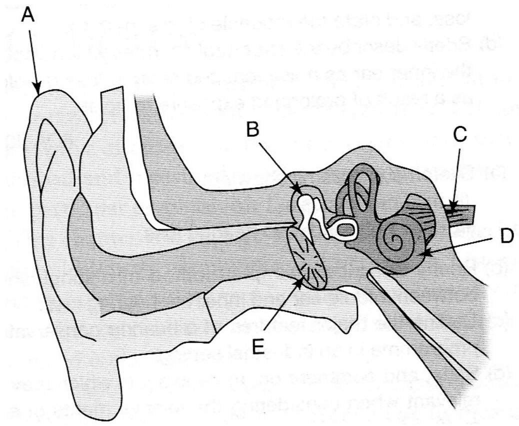
Solução

Agora $L_{eq} = 10\log\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N} t_i \times 10^{L_i/10}\right]$ então

$$L_{eq} = 10\log\left[\frac{1}{40}\left(30\times 10^{85/10} + 9\times 10^{95/10} + 10^{100/10}\right)\right]$$
$$= 89.8 \text{ dBA}$$

Problemas

1. Considere o funcionamento do ouvido.
(a) Identifique os componentes do ouvido representados pelas letras A a E no diagrama.



(b) Descreve, com a ajuda de um diagrama, os componentes do ouvido e descreve o seu papel na transformação do som no ouvido externo de impulsos no nervo auditivo.
(c) Descreve os defeitos de audição que não são atribuídos à exposição ao ruído. Num dos casos, mostre graficamente, o efeito de idade na perda de audição como função de frequência.
(d) Descreve os defeitos auditivos que sejam diretamente atribuíveis a danos causados pelo ruído.
(e) Determine o nível sonoro contínuo equivalente para ruídos de 80 dB(A) que dura 30 horas, 90 dB(A) que dura 9 horas e 100dB(A) que dura 1 hora durante uma semana de 40 horas.

2. Explique o que se entende por um contorno de volume igual e esboce as formas aproximadas de três desses contornos para níveis de sonoridade baixo, médio e alto, respectivamente. Explique a relação entre estes e a ponderação A.
Uma análise de oitava do ruído numa oficina produziu os seguintes resultados.

Frequência central da banda de oitavo (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nível (dB)	85	87	76	73	72	70	60	58

Calcule (a) a sonoridade em Sones, (b) a sonoridade em Phons e (c) o nível de som em dBA.

3. Calcule a sonoridade em Phons e o nível de ruído percebido em PNdB do ruído que possui a seguinte análise de banda de oitava:

Frequência central da banda de oitavo (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nível (dB)	73	70	69	71	70	65	71	56

4. Um análise de banda de oitava do ruído numa oficina mecânica forneceu os seguintes resultados:

Frequência central da banda de oitavo (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
SPL (dB)	68	72	90	87	86	88	90	84

Determine a sonoridade em phons e o nível de ruído percebido em PNdB.

5. Calcule o nível sonoro contínuo equivalente durante um dia útil de oito horas para um funcionário exposto ao seguinte padrão de níveis de ruído e tempos de exposição:

94 dBA durante 3 h
89 dBA durante 2 h
98 dBA durante 0.5 h
83 dBA durante 2.5 h

6. O ruído de uma zona de obras é causado por cinco máquinas. Os períodos de operação de cada máquina durante o dia útil e o nível de ruído produzido numa propriedade nos limites da zona são mostrados abaixo. Calcule o nível de ruído contínuo equivalente num dia útil de 12 horas.

Compressor	83 dBA durante 5 h
Escavadora	85 dBA durante 2 h
Trator	76 dBA durante 6 h
Bomba	75 dBA durante 7 h
Piledriver	88 dBA durante 1.5 h

7. Calcule o efeito de espalhar as operações do canteiro de obras do exemplo anterior por um período de 18 horas, em vez de um período de 12 horas.

8. Qual é o tempo máximo que um funcionário pode ficar numa oficina em que o nível de ruído é de 101 dBA sem usar proteção auditiva se a sua dose de ruído não exceder $L_{\mathrm{Aeq}} = 85$ dBA durante o período de trabalho de oito horas?

(a) Suponha que, durante o resto do período, o funcionário trabalhe num ambiente silencioso (< 75 dBA).

(b) Suponha que, durante o restante do período, o funcionário esteja sujeito a um nível constante de 80 dBA.

9. O nível de ruído em um local no qual se propõe construir uma urbanização resulta principalmente de comboios numa linha ferroviária próxima. Existem três tipos de comboios que utilizam a linha - comboios expressos rápidos, comboios suburbanos mais lentos e comboios de mercadorias. Propõe-se prever o nível de ruído contínuo equivalente na urbanização durante um período de 24 horas a partir de medições de ruído de amostra de cada um dos três comboios. Os resultados dessas medições são

- para comboios rápidos $L_{\mathrm{Aeq}} = 85$ dBA durante um período de 12 s
- para comboios lentos $L_{\mathrm{Aeq}} = 78$ dBA durante um período de 18 s
- para comboios de mercadorias $L_{\mathrm{Aeq}} = 76$ dBA durante um período de 24 s

Durante o período de 24 horas, existem 120 comboios rápidos, 200 comboios lentos e 80 comboios de mercadorias. Calcule o nível de ruído contínuo equivalente durante um período de 24 horas.

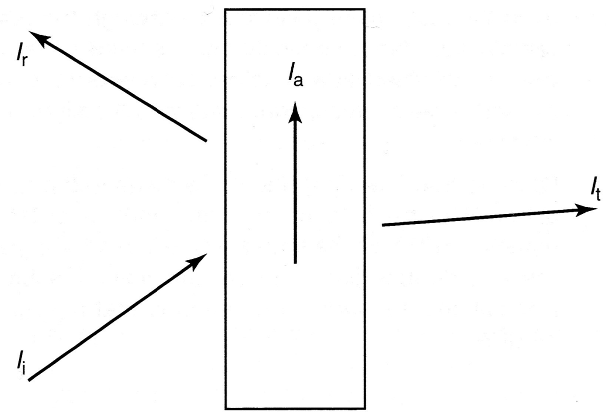
4. Acústica arquitetónico

Introdução

Nesta seção, vamos considerar o comportamento do som em espaços confinados - salas em casas, escritórios, teatros, salas de aula etc., especialmente a absorção do som nas superficies da sala - chão, paredes e teto.

Reflexão, absorção e transmissão do som

Vamos considerar uma feixe de som incidente numa parede:



A partir da lei de conservação de energia,

$$I_i = I_r + I_t + I_a$$

onde I_i, I_r, I_t e I_a são as intensidades de som incidente, reflectida, transmitida e absorvida.

As frações da energia de som que são refletida e transmitida pela superfície são os coeficientes de reflexão, *r*, e transmissão, *t*:

$$r = I_r / I_i = p_r^2 / p_i^2$$

e

$$t = I_t / I_i = p_t^2 / p_i^2$$

O coeficiente de absorção é definido de forma diferente:

$$\alpha = \left(I_a + I_t\right) / I_i$$

e

$$\alpha = 1 - r$$

e varia entre

0 (refletor perfeito)

e

1 (absorvente perfeito).

Absorção de som

Agora, uma superfície com uma area superficial S m² (por exemplo, um tapete) com um coeficiente de absorção α apresenta uma absorção

$$A = S\alpha$$

Por exemplo,

area de tapete, $A = 10\ \text{m}^2$ e o coeficiente de absorção, $\alpha = 0.6$

a absorção fornecida pelo tapete é $6\ \text{m}^2$ - equivalente a $6\ \text{m}^2$ de absorvente perfeito.

Numa sala com várias superfícies S_1, S_2, S_3 etc,

$$\begin{aligned} A_{\text{TOTAL}} &= A_1 + A_2 + A_3 + \ldots \\ &= S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \ldots \end{aligned}$$

Agora, uma superfície com uma area superficial S m² (por exemplo, um tapete) com um coeficiente de absorção α apresenta uma absorção

$$A = S\alpha$$

Por exemplo,

area de tapete, $A = 10\ \text{m}^2$ e o coeficiente de absorção, $\alpha = 0.6$

a absorção fornecida pelo tapete é $6\ \text{m}^2$ - equivalente a $6\ \text{m}^2$ de absorvente perfeito.

Numa sala com várias superfícies S_1, S_2, S_3 etc,

$$A_{\text{TOTAL}} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$$
$$= S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots$$

Se a area superficial total da sala é S_{TOTAL} então

$$\alpha_{\text{MED}} = A_{\text{TOTAL}} / S_{\text{TOTAL}}$$

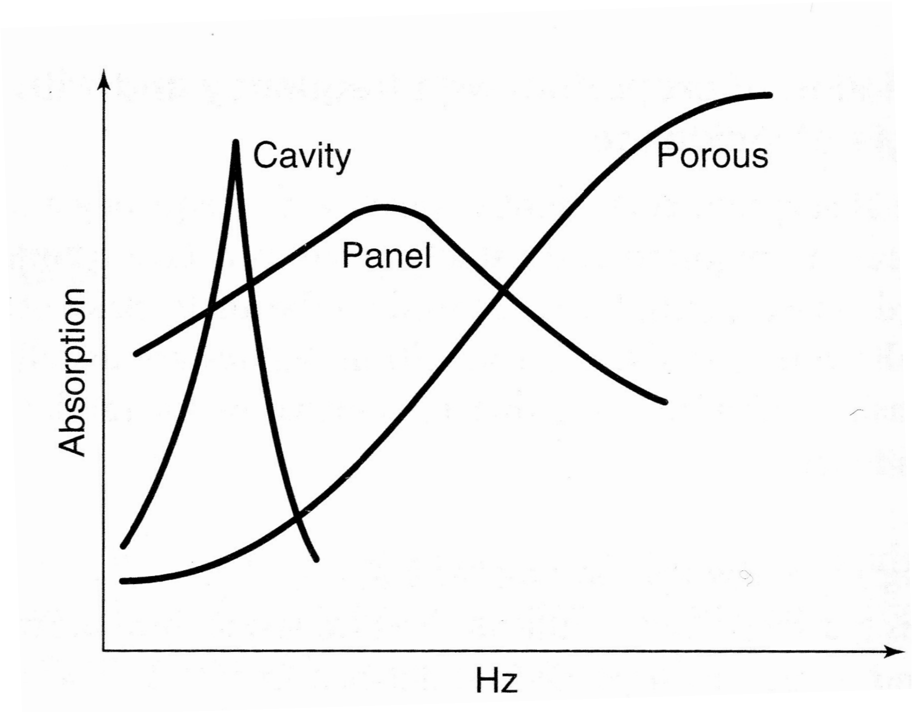
onde

$$S_{\text{TOTAL}} = 2(C \times L + C \times A + L \times A)$$

onde C = comprimento, L = largura, A = altura da sala.

Existem três tipos de absorventes:

- absorventes porosos
- absorventes de painel e
- absorventes de cavidade.



Aqui, só vamos considerar absorventes porosos.

Absorventes porosos funcionam numa extensa gama de frequências

As partículas de ar vibrantes se esfregam contra fibras ou espuma e o atrito faz com que a energia sonora seja convertida em calor, resultando numa redução na amplitude das ondas sonoras.

A absorção depende da porosidade do material, que por sua vez depende

- da densidade da fibra

e

- do espaçamento médio entre as fibras

Existe uma porosidade ideal que permite que o som seja transmitido para a camada porosa (em vez de ser refletido na superfície), mas que seja absorvido eficientemente uma vez que tenha entrado na camada.

Menos espaço entre as fibras promove

- atrito e absorção sonora,

mas

se a densidade da fibra for muito alta, o aumento da impedância acústica da camada porosa causa

- reflexão do som na superfície

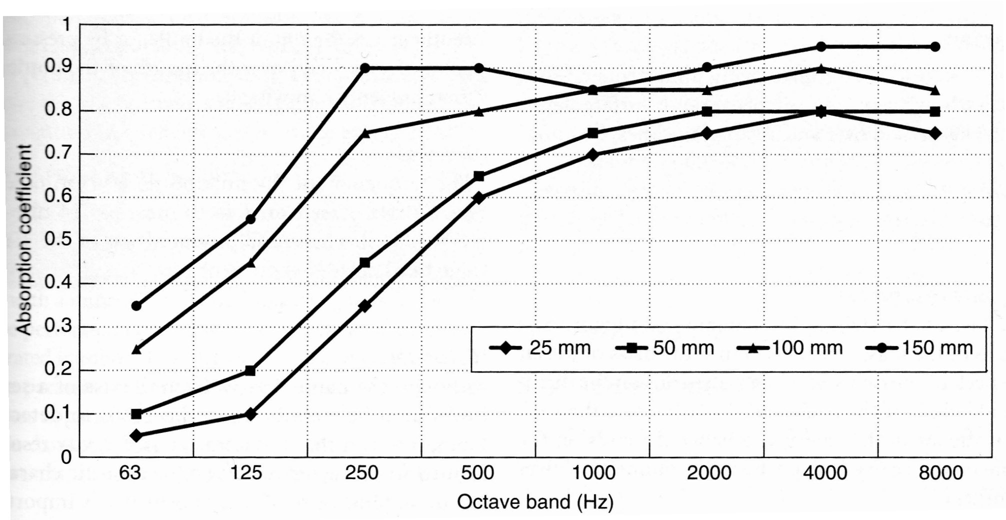
e, portanto, menos absorção no interior do material.

(Quaisquer filmes ou camadas de superfície aplicados à superfície de uma camada porosa podem reduzir a quantidade de absorção que ocorre).

Valores típicos de coeficientes de absorção:

	Typical absorption coefficients in octave bands					
Material	125	250	500	1000	2000	4000
Concrete, unpainted	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Wood floor on joists	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Brickwork	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Plastered wall	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Glazing (4 mm)	0.30	0.20	0.10	0.07	0.05	0.02
Cord carpet	0.05	0.05	0.10	0.20	0.45	0.65
Axminster carpet	0.08	0.8	0.30	0.60	0.75	0.80
75 mm mineral wool, 60 kg/m^3	0.34	0.95	1	0.82	0.87	0.86
25 mm acoustic plaster on solid base	0.03	0.15	0.50	0.80	0.85	0.80
13 mm ceiling tile on slab	0.2	0.25	0.70	0.85	0.70	0.60
13 mm ceiling tile over 500 mm air space	0.75	0.70	0.65	0.85	0.85	0.80

- o coeficiente de absorção aumenta com a frequência e com frequências baixas, o desempenho melhora com a espessura da camada absorvente:



Acústica da Sala

A acústica da sala é a determinação do

> nível de pressão sonora em qualquer lugar da sala,

quando a fonte foi

> ligada por tempo suficiente para que o nível de pressão sonora se torne estável (o caso em estado estacionário)

ou

> na situação transitória logo após a fonte ter ligado ou desligado.

Para determinar o nível de pressão sonora em todo o lado dentro de uma sala, utilizamos uma das três abordagens:

1. abordagem geométrica

- limitada a frequências médias e altas.

2. abordagem de teoria de onda

- limitada a salas pequenas com geometrias simples (retangulares).

3. abordagem estatística

- limitada à previsão de valores médios de dados acústicos (por exemplo, o SPL ou o tempo de reverberação);
- baseia-se num equilíbrio de energia acústica entre a quantidade de energia que entra na sala (da fonte) e a quantidade de energia que sai da sala (absorção).

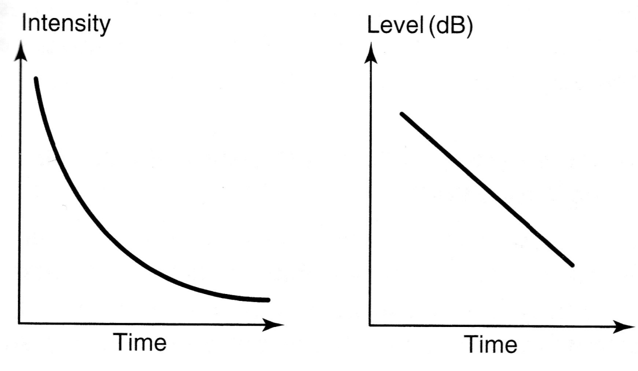
Os métodos mais comuns são os de Eyring e Sabine.

Aqui, vamos considerar a abordagem estatística para determinar o tempo de reverberação.

Reverberação é um efeito físico gerado por ondas sonoras quando estas são refletidas de forma reiterativa.

Na prática, o que ouvimos é a persistência de um som logo após ser extinta a emissão por sua fonte sonora e que ocorre num ambiente fechado ou parcialmente fechado - numa sala.

A intensidade decai exponencialmente:

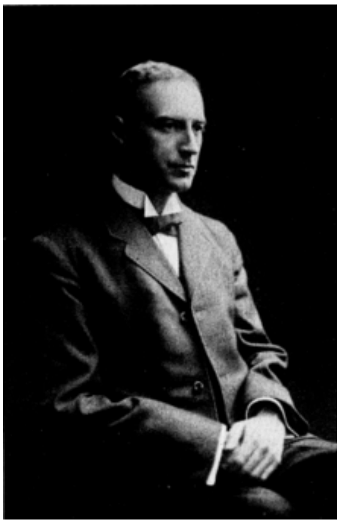


A Acústica de Sabine (caso transiente)

W.C. Sabine foi o primeiro cientista a conduzir

uma investigação sistemática sobre acústica de salas

a partir de 1895.



WC Sabine 1868 - 1919

Ele definiu o tempo de reverberação como o tempo necessário para que a intensidade do som numa sala caia para um milionésimo de seu valor original (60 dB) medido a partir do momento que a fonte de som está desligada.

Deduziu uma equação para o tempo de reverberação de uma sala, *T* que depende do seu volume, *V*, e a quantidade de absorção sonora que contém, *A*:

Pressupostos:

- a densidade de energia sonora é uniforme na sala
- a energia sonora é transmitida igualmente em todas as direções
- a fonte sonora mantém um fornecimento constante de energia do som
- a perda de energia sonora occorre só nas paredes da sala
- a absorção sonora é distribuída uniformemente sobre as superfícies da sala

Agora a taxa de absorção do som pelas superficies da sala é dada por

$$\alpha IS$$

e a quantidade total de energia de som na sala é dada por

$$\varepsilon V$$

Também, a taxa de variação da energia do som é dada por

$$-\frac{d}{dt}(\varepsilon V) = -V\frac{d\varepsilon}{dt}$$

É negativo porque ε está diminuindo com o tempo.

Mas, é possível mostrar que

$$\varepsilon = \frac{4I}{c}$$

Portanto, a taxa de variação da energia do som

$$\text{-}V\frac{d}{dt}\left(\frac{4I}{c}\right) = -\frac{4V}{c}\frac{dI}{dt}$$

Agora,

Taxa de decaimento = Taxa de absorção

ou

$$-\left(\frac{4V}{c}\right)\frac{dI}{dt} = \alpha SI$$

Portanto

$$\frac{dI}{dt} = -\left(\frac{Ac}{4V}\right)I$$

como $\alpha S = A$.

Resolvendo esta equação dá

$$I = I_0 e^{-(Ac/4V)t}$$

ou

$$\ln\left(I/I_0\right) = -\left(Ac/4V\right)t$$

Usando a relação $\log X = \ln X/2.3$ temos

$$\log\left(I/I_0\right) = -\frac{1}{2.3}\left(Ac/4V\right)t$$

e

$$10\log\left(I/I_0\right) = -\frac{10}{2.3}\left(Ac/4V\right)t$$

Quando $t = T$ (tempo de reverberação), temos

$$10\log\left(I/I_0\right) = 60 \text{ dB}$$

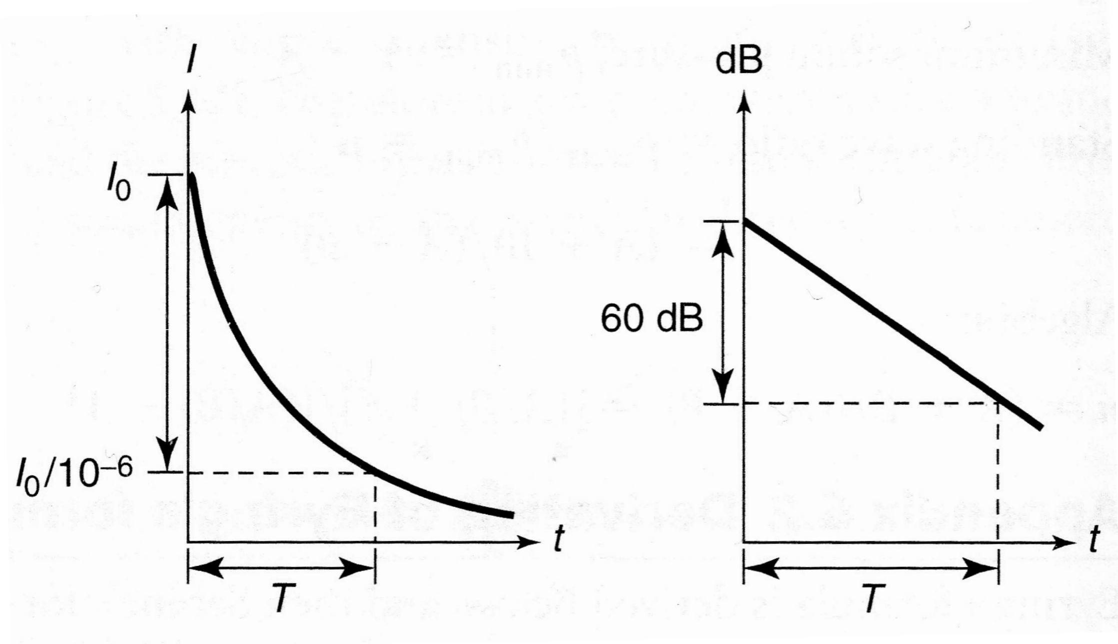
e

$$60 = \left(10 \times c/2.3 \times 4\right)\left(AT/V\right)$$

Com c = 340 m/s

$$T = 0.16V/A$$

- a equação de Sabine.



A equação de Sabine é a mais simples para prever o tempo de reverberação. A equação de Eyring é mais precisa, mas mais complicada:

Seja I_0 a intensidade de som em t = 0 quando a fonte de som é desliga e o coeficiente de absorção média das superfícies é α_{MED}.

Então,

A intensidade depois de 1 reflexão = $I_1 = \left(1 - \alpha_{\text{MED}}\right) I_0$
A intensidade depois de 2 reflexões = $I_2 = \left(1 - \alpha_{\text{MED}}\right)^2 I_0$
A intensidade depois de n reflexões = $I_n = \left(1 - \alpha_{\text{MED}}\right)^n I_0$

O tempo de reverberação é o tempo para a intensidade baixar para 1/1 000 000 do valor original, então

$$I_n / I_0 = (1-\alpha_{\mathrm{MED}})^n = 10^{-6}$$

ou

$$n = \frac{-6}{\log(1-\alpha_{\mathrm{MED}})}$$

Pode-se mostrar que

> a distância média entre as colisões com as paredes de uma sala retangular, de volume V e area superficial total S m^2

é dada por

$$4V/S \text{ m}.$$

Então n reflexões demoram $4Vn/cS$ s . Assim, o tempo de reverberação, T, é dado por (usando $\ln X = 2.303 \log X$):

$$\begin{aligned} T &= 4Vn/cS \\ &= (4V/cS)\left[-6/\log(1-\alpha_{\mathrm{MED}})\right] \\ &= 0.16V/\left\{-S\ln(1-\alpha_{\mathrm{MED}})\right\} \end{aligned}$$

- a equação de Eyring.

Finalmente, com $\alpha_{\mathrm{MED}} \ll 1$, $-\ln(1-\alpha_{\mathrm{MED}}) \approx \alpha_{\mathrm{MED}}$ e temos

$$T = 0.16V/S\alpha_{\mathrm{MED}}$$

- a equação de Sabine.

Exemplo

Uma sala tem dimensões, 8 m x 6 m x 4 m. Qual é o tempo de reverberação usando a equação de Sabine e a equação de Eyring?
Dados:

$$\alpha_{\text{Chão}} = 0.02 \qquad \alpha_{\text{Paredes}} = 0.04 \qquad \alpha_{\text{Teto}} = 0.1$$

Solução

$$\text{Volume} = 8\times 6\times 4 = 192 \text{ m}^3$$
$$\text{Area of walls} = 2\times\left[(8\times 4)+(8\times 4)\right]+48 = 208 \text{ m}^2$$

Então

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^{3} S_i\alpha_i \\ &= \left[0.04\times 112+0.02\times 48+0.1\times 48\right] \\ &= 10.24 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^{3} S_i \\ &= \left[112+48+48\right] \\ &= 208 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{MED}} &= A/S \\ &= 10.24/208 = 0.049 \end{aligned}$$

Equação de Sabine:

$$\begin{aligned} T &= 0.16V/A \\ &= 0.16\times 192/10.24 = 3.0 \text{ s} \end{aligned}$$

Equação de Eyring:

$$\begin{aligned} T &= 0.16\times V/\left[-S\times\ln\left(1-\alpha_{\text{MED}}\right)\right] \\ &= 0.16\times 192/\left[-208\times\ln\left(1-0.049\right)\right] = 2.9 \text{ s} \end{aligned}$$

Exemplo

Para reduzir o tempo de reverberação na sala no exemplo anterior, o chão é coberto com um tapete com $\alpha = 0.8$, as paredes são revestidas com um material absorvente com $\alpha = 0.2$ e o teto é revestido com um material absorvente com $\alpha = 0.3$. Qual é o tempo de reverberação usando a equação de Sabine e a equação de Eyring?

Solução

$\alpha_{\text{MED}} = 0.36$

Sabine: T = 0.41 s Eyring: T = 0.33 s

Exemplo

Qual é o tempo de reverberação usando a equação de Sabine e a equação de Eyring para uma sala de dimensões: 16 m x 12 m x 8 m e com os coeficientes de absorção originais:

$\alpha_{\text{Chão}} = 0.02$ $\alpha_{\text{Paredes}} = 0.04$ $\alpha_{\text{Teto}} = 0.1$

Solução:

$\alpha_{\text{MED}} = 0.049$

Sabine: T = 6.0 s Eyring: T = 5.9 s

Exemplo

Repita os cálculos para a sala maior quando tratado como antes:

$\alpha_{\text{Chão}} = 0.8$ $\alpha_{\text{Paredes}} = 0.2$ $\alpha_{\text{Teto}} = 0.3$

Solução:

$\alpha_{\text{MED}} = 0.36$

Sabine: T = 0.82 s Eyring: T = 0.66 s

Conclusões:
A equação de Sabine é usada quando: $\alpha_{\text{MED}} < 0.2$ - quando a sala é 'live'
A equação de Eyring é usada quando: $\alpha_{\text{MED}} > 0.2$ - quando a sala é 'dead'

Para os maiores espaços (catedrais, salas de espetáculo, etc), a absorção do ar se torna importante em altas frequências. Aqui

$$T = 0.16V / \left[\left(S \times \alpha_{\text{MED}} \right) + kV \right]$$

onde k é a humidade.

Exemplo

Um catedral tem volume 60 000 m^3 e area superficial interno 42 000 m^2 com $\alpha_{\text{MED}} = 0.02$.

Qual é o tempo de reverberação

(a) assumindo só a absorção superficial
(b) incluíndo absorção devido ao ar com k = 0.02 a 4kHz com humidade 60%.

Solução

(a) $A = 42000 \times 0.02 = 840 \text{ m}^2$ e $T = 0.16 \times 60000/840 = 11.4 \text{ s}$

(b) $A = 840 + (60000 \times 0.02) = 2040 \text{ m}^2$ e $T = 0.16 \times 60000/2040 = 4.7 \text{ s}$

O tempo de reverberação ótimo de espaços

Para cada espaço há um tempo de reverberação ótimo dependendo da função deste espaço.

Se o tempo de reverberação for:

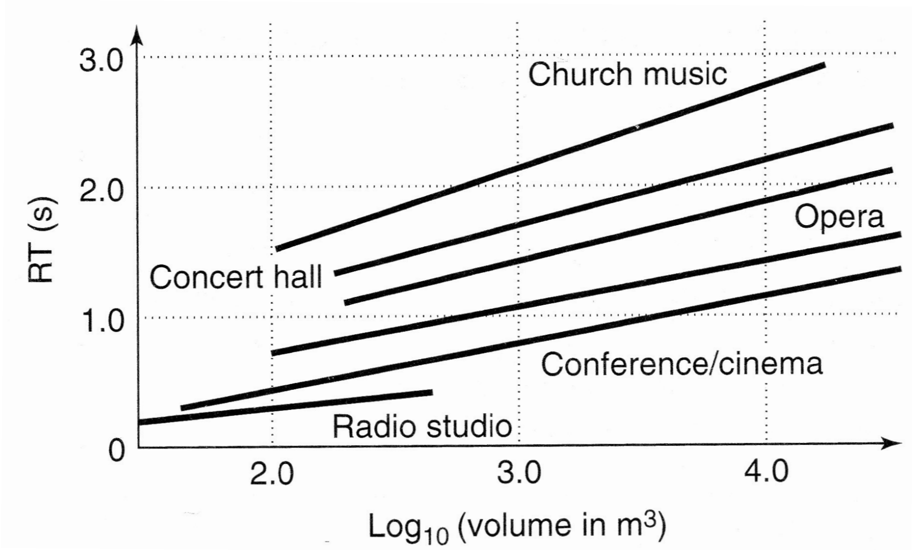
- muito pequeno,

então não haverá som refletido para suportar o som direto e o nível sonoro não será suficientemente alto na parte de trás da sala e faltará riqueza à música, riqueza essa que acontece quando a reverberação provoca a mistura de notas. Dizem que a sala está **seca** demais para a música.

- muito grande,

o discurso torna-se ininteligível e a música perde a clareza.

Os valores ideais para vários tipos de música e para vários volumes da sala:



Um valor adequado para o discurso é ~1s com valores para música sendo ~2s.

Para escolas:

Type of room	Reverberation time in seconds
Swimming pool	Less than 2.0
Indoor sports halls, gymnasia	Less than 1.2
Large lecture rooms (more than 50 people), libraries, drama studios, music classroom, dining rooms, offices, staff rooms	Less than 1.0
Small lecture rooms (less than 50 people), classrooms (secondary school), individual study rooms, small music practice rooms	Less than 0.8
Primary school classrooms, nursery school playrooms	Less than 0.6
Classrooms for hearing impaired students and for speech therapy	Less than 0.4

Para ter melhores condições de audição, é essencial que um salão tem o volume correto para seu uso.

Estes valores (em m^3 / pessoa) são:

	Minimum	Optimum	Maximum
Concert halls	6.5	7.1	9.9
Italian-type opera houses	4.0	4.2–5.1	5.7
Churches	5.7	7.1–9.9	11.9
Cinemas	–	3.1	4.2
Rooms for speech	–	2.8	4.9

- o volume por pessoa depende da finalidade para a qual o edifício será usado.

Exemplos:

- salas de concerto:

Name	Volume (m^3)	Audience capacity	Volume per audience seat (m^3)	Mid-frequency RT in seconds (full hall)
St Andrew's Hall, Glasgow (built 1877)	16,100	2133	7.6	1.9
Carnegie Hall, New York (1891)	24,250	2760	8.8	1.7
Symphony Hall, Boston (1900)	18,740	2631	7.1	1.8
Tanglewood Music Shed, Lennox, Mass. (1938)	42,450	6000	7.1	2.05
Royal Festival Hall (1951)	22,000	3000	7.3	1.47
Liederhalle, Grosser Saal, Stuttgart (1956)	16,000	2000	8.0	1.62
F. R. Mann Concert Hall, Tel Aviv (1957)	21,200	2715	7.8	1.55
Beethovenhalle, Bonn (1959)	15,700	1407	11.2	1.7
Philharmonic Hall, New York (1962)	24,430	2644	9.3	2.0
Philharmonic Hall, Berlin (1963)	26,030	2200	11.8	2.0

- salas de opera conhecidas:

Name	Volume (m^3)	Audience capacity	Volume per audience seat (m^3)	Mid-frequency RT in seconds (full hall)
Teatro alla Scala, Milan (1778)	11,245	2289	4.91	1.2
Academy of Music, Philadelphia (1857)	15,090	2836	5.32	1.35
Royal Opera House (1858)	12,240	2180	5.6	1.1
Theatre National de L'Opera, Paris (1875)	9,960	2131	4.67	1.1
Metropolitan Opera House, New York (1883)	19,520	3639	5.36	1.2

Exemplo

Uma oficina com 8 m de comprimento, 6 m de largura e 4 m de altura apresenta paredes com superficies duras está a ser remodelada para se converter numa sala para reuniões usando tapete e painéis de absorção de som. O tempo de reverberação antes da remodelação é 3.0 s.
(a) calcule quanta absorção sonora extra deve ser introduzida na sala para reduzir o tempo de reverberação para 0.8 s, adequado para fala.
(b) Qual é a area dos painéis necessária?
Dados: $\alpha_{\text{Tapete}} = 0.2$, $\alpha_{\text{Paineis}} = 0.4$ (para paredes e teto).

Solução

(a) Como $T = 0.16 \times V/A$, $A = 0.16 \times V/T$ então a absorção existente é

$$A = 0.16 \times V/T = 0.16 \times 192/3.0 = 10.2 \text{ m}^2$$

A quantidade de absorção necessária para $T = 0.8$ é

$$A = 0.16 \times V/T = 0.16 \times 192/0.8 = 38.4 \text{ m}^2$$

Portanto a absorção adicional necessária é 38.4 - 10.2 = 28.2 m^2.

(b) A absorção adicional devida a tapete é

$$A_{\text{Tapete}} = S\alpha = 48 \times 0.2 = 9.6 \text{ m}^2$$

A absorção necessária das painéis é 28.2 - 9.6 = 18.6 m^2. Portanto a area dos painéis é

$$S = A/\alpha = 18.6/0.4 = 46.5 \text{ m}^2$$

Contudo, estamos a cobrir a absorção das superfícies existentes. Vamos calcular a absorção média das superficies existentes. Como $S_{\text{Sala}} = 208 \text{ m}^2$,

$$\alpha_{\text{MED}} = A_{\text{Sala}}/S_{\text{Sala}} = 10.2/208 = 0.05$$

A área da superfície original coberta por painéis e tapete é 48 + 46.5 = 94.5 m^2.

Portanto, a absorção original é $94.5 \times 0.05 = 4.7 \text{ m}^2$

Então, uma área de $4.7/0.4 = 11.8 \text{ m}^2$ de painéis é necessária.

A Acústica de Sabine (caso transiente)

No estado estacionário, a taxa de fornecimento de energia de som é igual à taxa de absorção de som e o nível de pressão sonora resultante chama-se o nível de pressão acústica reverberante na sala.

A potência de som que contribui ao campo de som reverberante é

$$W_{\mathrm{R}} = W\left(1-\alpha_{\mathrm{MED}}\right) .$$

Podemos também dizer que a taxa de fornecimento de energia de som é igual à taxa de absorção de som, ou

$$W_{\mathrm{R}} = I_{\mathrm{R}} S \alpha_{\mathrm{MED}}$$

onde I_{R} é a intensidade do campo de som reverberante e S é a área total das superficies na sala. Portanto

$$I_{\mathrm{R}} S \alpha_{\mathrm{MED}} = W\left(1-\alpha_{\mathrm{MED}}\right)$$

e

$$I_{\mathrm{R}} = W\left(1-\alpha_{\mathrm{MED}}\right) / S \alpha_{\mathrm{MED}} .$$

Se definimos a constante de sala $R_{\mathrm{C}} = \left(S \alpha_{\mathrm{MED}}\right) / \left(1-\alpha_{\mathrm{MED}}\right)$ assim

$$I_{\mathrm{R}} = W / R_{\mathrm{C}}$$

Agora, uma relação entre a intensidade do campo de som reverberante e a pressão é

$$I_{\mathrm{R}} = p_{\mathrm{R}}^{2} / 4 \rho c$$

e assim

$$p_{\mathrm{R}}^{2} / 4 \rho c = W / R_{\mathrm{C}}$$

e

$$p_{\mathrm{R}}^{2} = W 4 \rho c / R_{\mathrm{C}}$$

Então, o nível do som reverberante é

$$\begin{aligned}
L_{\mathrm{R}} &= 10\log\left(p_{\mathrm{R}}^2 / p_0^2\right) \\
&= 10\log\left(W\,4\rho c / R_C p_0^2\right) \\
&= 10\log\left(W/W_0\right) + 10\log\left(4W_0\rho c / R_C p_0^2\right) \\
&= 10\log\left(W/W_0\right) + 10\log\left(4\times10^{-12}\times420 \Big/ R_C\left(2\times10^{-5}\right)^2\right) \\
&= L_W + 10\log\left(4/R_{\mathrm{C}}\right)
\end{aligned}$$

A pressão sonora direta p_D e a intensidade sonora direta I_D à distância *r* da fonte (do fator de diretividade *Q*) são dadas por

$$I_D = p_D^2 / \rho c = QW / 4\pi r^2$$

Então

$$p_D^2 = W\rho c Q / 4\pi r^2$$

e a pressão sonora total é

$$p_{\mathrm{T}}^2 = p_{\mathrm{D}}^2 + p_{\mathrm{R}}^2 = W\rho c Q / 4\pi r^2 + W\rho c 4 / R_{\mathrm{C}}$$

e o nível de pressão sonora é

$$L_{\mathrm{P}} = L_{\mathrm{W}} + 10\log\left[\left(Q/4\pi r^2\right) + \left(4/R_{\mathrm{C}}\right)\right]$$

Exemplo

Uma sala com dimensões 8 m de comprimento, 6 m de largura e 4 m de altura tem superfícies com com coeficientes de absorção: chão 0.02, paredes 0.04 e teto 0.1.
Uma fonte de som omnidirecional com uma potência de 0.05 W está localizada no centro da sala. Determine:
(a) a constante da sala;
(b) o nível de som reverberante;
(c) os níveis de pressão de som direto e total às distâncias de 1 m e 2 m da fonte de som.

Solução

(a) Agora

$$R_C = (S\alpha_{MED})/(1-\alpha_{MED}) \text{ onde}$$

$$A = 8\times 6\times 0.02 + 2\times(8\times 4 + 4\times 6)\times 0.04 + 6\times 8\times 0.1 = 10.24 \quad \text{e}$$
$$S = 2\times(8\times 4 + 4\times 6 + 6\times 8) = 208 \text{ m}$$

Então

$$\alpha_{MED} = A/S = 10.24/208 \approx 0.05$$

e

$$R_C = (208\times 0.05)/(1-0.05) = 10.8 \text{ m}^2$$

(b) Agora

$$L_R = L_W + 10\log(4/R_C) \text{ onde}$$

$$L_W = 10\log\left(0.05/10^{-12}\right) = 107 \text{ dB}$$

entâo

$$L_R = 107 + 10\log(4/10.8) = 102.7 \text{ dB}$$

(c) Agora

$$L_D = L_W - 20\log r - 11$$
$$= 107 - 20\log 1 - 11 = 96 \text{ dB}$$
$$= 107 - 20\log 2 - 11 = 90 \text{ dB}$$

$$L_T = L_W + 10\log\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_C}\right)$$
$$= 107 + 10\log\left(\frac{1}{4\pi 1^2} + \frac{4}{10.9}\right) = 103.5 \text{ dB}$$
$$= 107 + 10\log\left(\frac{1}{4\pi 2^2} + \frac{4}{10.9}\right) = 102.9 \text{ dB}$$

Agora, em espaços como fábricas e oficinas, o principal objetivo da adição de absorção de som é reduzir o nível de som reverberante.

Considere uma sala em que o nível do som reverberante é L_1 e a absorção de som e constante de sala existentes são A_1 e R_{C1}. Quando a absorção de som é aumentada para A_2 e a constante de sala é aumentada para R_{C2}, o nível do som reverberante reduz a L_2.

Portanto,

$$L_1 = L_W + 10\log\left(4/R_{C1}\right)$$

e

$$L_2 = L_W + 10\log\left(4/R_{C2}\right)$$

então

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= 10\log\left(4/R_{C1}\right) - 10\log\left(4/R_{C2}\right) \\ &= 10\log\left(R_{C2}/R_{C1}\right) \end{aligned}$$

Como fábricas e oficinas são espaços altamente reverberantes com muito pouca absorção intrínseca, aplica-se a aproximação $R_C \approx A$ e

$$L_1 - L_2 = 10\log\left(A_2/A_1\right)$$

Exemplo

Uma oficina de dimensões 20 m x 8 m x 4 m tem um tempo de reverberação de 3.8 s. O nível de pressão de som reverberante é 86 dB. Propõe-se a reduzir o nível de som pela suspensão de material absorvente na sala. Determine a redução no nível de som se a absorção $A = 50\ \text{m}^2$ é introduzida na oficina.

Solução

Agora

$$A_1 = 0.16 \times V/T = 0.16 \times 640/3.8 = 26.9\ \text{m}^2$$

e

$$A_2 = 26.9\ + 50 = 76.9\ \text{m}^2$$

Portanto

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= 10\log\left(A_2/A_1\right) = 10\log\left(76.9/26.9\right) \\ &= 4.6\ \text{dB} \end{aligned}$$

e há uma redução de 86 dB para 81.4 dB.

Índice de redução de som de partições compostas

A transmissão direta do som entre duas salas é determinada pelo índice de redução do som, R, da partição (dB), e:

$$R = 10\log\left(1/t\right) \text{ dB}$$

Por exemplo

Se $t = 0.001$ então $R = 30$ dB

$t = 0.00001$ $R = 50$ dB

Uma parede, divisória ou fachada pode consistir em mais de um material ou elemento de construção - pode haver uma parede, uma janela ou uma porta.

Neste caso, podemos calcular o índice de redução de som efetivo ou médio. Há três passos:

1. Calcule os valores individuais de t a partir dos valores de R:

$$t_1 = 1/10^{R/10}$$

Por exemplo:

Se $R = 44.6$ dB então $t = 0.000035$

2. Calcule o valor médio ponderado por área:

$$t_{\text{MED}} = \left(t_1 S_1 + t_2 S_2 + t_3 S_3 + \ldots + t_N S_N\right)/S_{\text{TOTAL}}$$

onde S_1, S_2, S_3,...,S_N são os componentes individuais da área e S_{TOTAL} é a área total.

3. Calcule o índice de redução de som efetivo:

$$R_{\text{MED}} = 10\log\left(1/t_{\text{MED}}\right)$$

Exemplo

Uma divisória entre duas salas tem dimensões 6 m x 3 m e contém uma porta de dimensões 2 m x 1 m e duas janelas, cada uma com dimensões 1,5 m x 1 m. Numa determinada banda de oitava, a parede tem um valor de *R* de 45 dB, a porta de 35 dB e a janela de 20 dB. Calcule o valor efetivo de R_{MED}.

Solução

1.

Parede:

$$\begin{aligned} t_{parede} &= 10^{-4.5} \\ &= 3.16 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

Porta:

$$\begin{aligned} t_{porta} &= 10^{-4.5} \\ &= 3.16 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Janela:

$$\begin{aligned} t_{janela} &= 10^{-2.0} \\ &= 0.01 \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} t_{\mathrm{MED}} &= \left[\left(13 \times 3.16 \times 10^{-5}\right) + \left(2 \times 3.16 \times 10^{-4}\right) + \left(3 \times 0.01\right)\right] \big/ 18 \\ &= 0.00173 \end{aligned}$$

3.

$$R_{\mathrm{MED}} = 10 \log\left(1/0.00173\right)$$
$$= 27.6 \text{ dB}$$

Agora, vamos considerar o efeito de buracos, lacunas, e vidros no isolamento acústico.

Orifícios e brechas:

Para orifícios e brechas, $t = 1$.

Exemplo:

Vamos repetir o exemplo anterior mas com uma brecha a volta da porta de 2 mm.

Solução:

Área da brecha:

$$A = 6 \times 0.002 = 0.012 \text{ m}^2$$

Assumindo que todas as outras áreas permaneçam inalteradas:

$$\begin{aligned} t_{\text{MED}} &= \left[\left(13 \times 3.16 \times 10^{-5}\right) + \left(2 \times 3.16 \times 10^{-4}\right) + \left(3 \times 0.01\right) + \left(0.012 \times 1.0\right)\right] / 18 \\ &= 0.00239 \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} R_{\text{MED}} &= 10 \log\left(1/0.00239\right) \\ &= 26.2 \text{ dB} \end{aligned}$$

Exemplo:

Qual é o índice efetivo de redução de som de uma parede com índice de redução de som de 40 dB, que contém um orifício de 0.1% da área da parede?

Solução:

Vamos assumir uma área total de 100
1.

Parede:

$$\begin{aligned} t_{parede} &= 10^{-40/10.} \\ &= 1.0 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Orifício:

$t_{orificio} = 1$

2.

$$t_{\text{MED}} = \left[\left(99.99 \times 1.0 \times 10^{-4}\right) + \left(0.01 \times 1.0\right)\right] \Big/ 100$$
$$= 0.0002$$

3.

$$R_{\text{MED}} = 10\log\left(1/0.0002\right)$$
$$= 36.9 \text{ dB}$$

Em geral, quanto maior o índice de redução de som da parede, maior o efeito do orifício, de modo que, para valores muito altos de R (50 ou 60 dB), mesmo orifícios muito pequenos têm um efeito limitador severo no isolamento acústico.

% area of hole	Effective or average sound reduction index of wall (dB)					
	10 dB	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB	60 dB
0.01%	10	20	29.6	37	39.6	40
0.1%	10	19.6	27.0	29.6	30	30
1%	9.6	17.0	19.6	20	20	20
10%	7.2	9.6	10	10	10	10
20%	5.5	6.8	7.0	7	7	7
50%	2.6	3.0	3	3	3	3

Vidros:

Para ilustrar o efeito de diferentes proporções de envidraçamento, consideremos uma fachada composta por oito painéis de área igual (12,5% cada), que são paredes com R = 50 dB ou envidraçados R = 20 dB em uma determinada banda de oitavas. O índice efetivo de redução de som para 0, 1, 2, 3, 4 e 8 vidros:

No. of glazed panels	% area of glazing	Composite *R* value
0	0	50
1	12.5	29
2	25	25
3	37.5	23
4	50	22
8	100	20

Exemplo:

A fachada de um edifício tem uma área de $25\ \mathrm{m}^2$ e é feita de tijolo com r = 50 dB numa banda de oitava específica e uma janela de índice de redução de som de 20 dB na mesma banda. Determine a área máxima da janela que é permitida se o índice efetivo de redução de som for 30 dB na mesma banda.

Solução:

Seja S_G a área da janela e então $(25 - S_G)$ a área da parede.

Agora

$$S_{parede} \times t_{parede} + S_{janela} \times t_{janela} = S_{\mathrm{TOTAL}} \times t_{\mathrm{MED}}$$

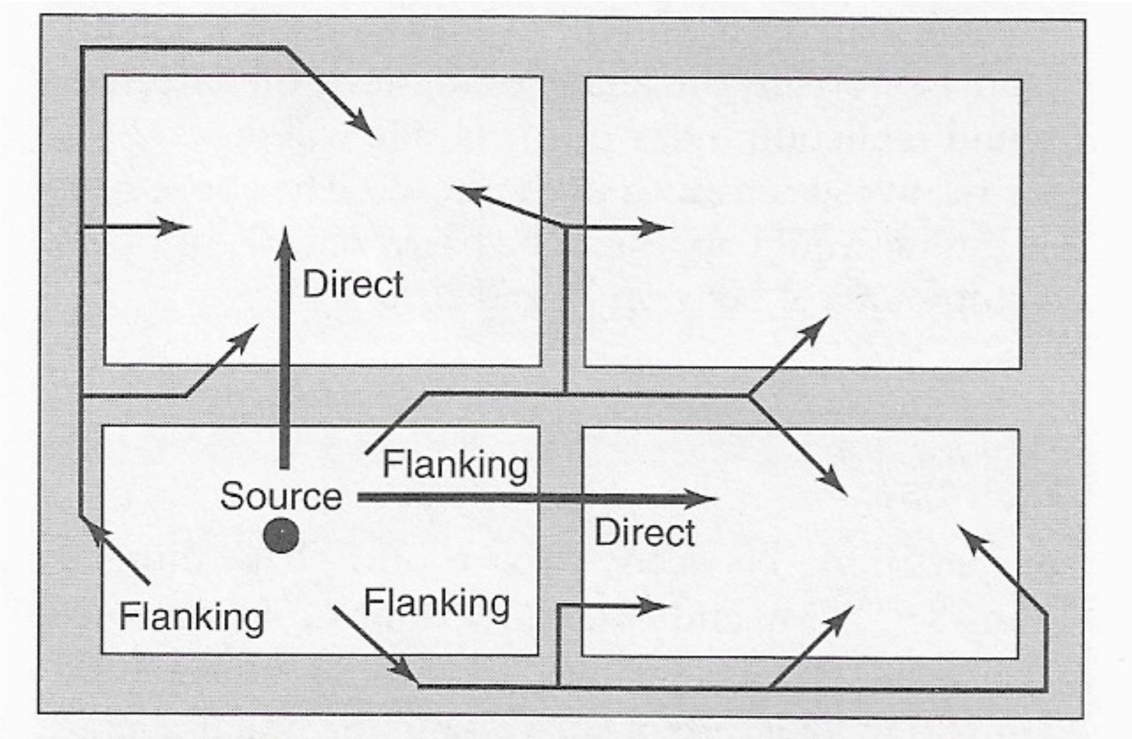
$$\left[\left(25 - S_{janela}\right)\times\left(10^{-50/10}\right)\right] + \left[S_{janela} \times \left(10^{-20/10}\right)\right] = 25 \times \left(10^{-30/10}\right)$$

Rearranjando

$$S = 2.48\ \mathrm{m}^2$$

Transmissão de som

Há dois tipos de transmissão de som de uma sala para outra:



- caminho direto de transmissão de som

e

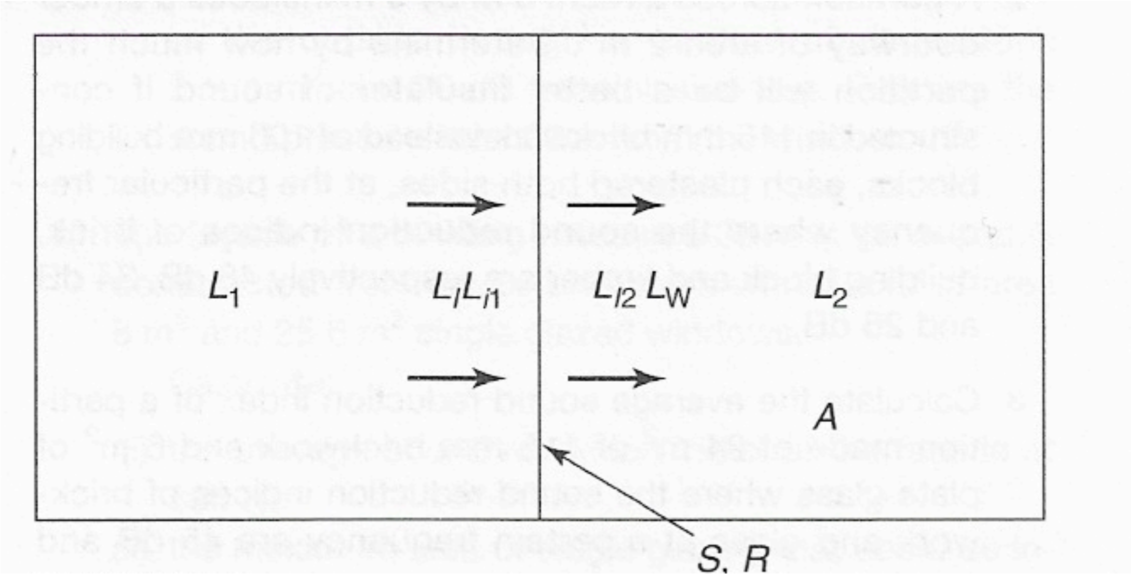
- caminho indireto de transmissão de som

O nível de diferença entre duas salas adjacentes

A diferença de nível entre duas salas adjacentes, decorrente da transmissão direta do som através da partição entre elas, depende de:

- R,
- a área da divisória S, e
- a absorção *A* na sala adjacente.

Considere as duas salas com uma partição entre elas:



O nível de intensidade sonora na superfície da partição da sala da fonte é

$$L_{I1} = L_1 - 6$$

Vamos agora considerar a transmissão de energia sonora pela partição. Sabemos que

$$t = I_2 / I_1 ,$$
$$R = 10\log(1/t) \text{ e}$$
$$L_{I1} = 10\log(I_1/I_0) \text{ e } L_{I2} = 10\log(I_2/I_0)$$

então

$$L_{I1} - L_{I2} = 10\log(I_1/I_2) = 10\log(1/t) = R$$

assim

$$L_{I2} = L_{I1} - R$$

ou

$$L_{I2} = L_1 - 6 - R .$$

O nível de pressão sonora que está a ser irradiado na sala receptora é

$$L_W = L_{I2} + 10\log S$$

Assim

$$L_W = L_1 - 6 - R + 10\log S$$

Finalmente, o nível de pressão sonora reverberante na sala receptora é

$$L_2 = L_W - 10\log\left(4/R_C\right)$$

mas como a sala receptora está 'live', $\alpha_{\mathrm{MED}} \ll 1$ e

$$R_C = S\alpha_{\mathrm{MED}}/\left(1-\alpha_{\mathrm{MED}}\right) \approx S\alpha_{\mathrm{MED}} = A$$

e

$$\begin{aligned} L_2 &= L_W + 10\log\left(4/A\right) \\ &= L_W - 10\log A + 6 \end{aligned}$$

Portanto,

$$L_2 = L_1 - 6 - R + 10\log S - 10\log A + 6$$

e simplificando

$$L_1 - L_2 = R - 10\log S + 10\log A$$

ou

$$L_2 = L_1 - R + 10\log S - 10\log A$$

ou

$$R = L_1 - L_2 + 10\log S - 10\log A$$

Exemplo

O ruído reverberante de uma oficina é transmitido para um escritório adjacente através de uma parede. As dimensões do escritório são 10 x 7 x 3 m e a parede é 7 x 3 m. O tempo reverberante numa banda de oitava específica é de 0.7 s para o escritório. Na mesma banda de oitava, o nível de pressão sonora reverberante na oficina é de 85 dB e a perda de transmissão da parede é de 50 dB. Determine o nível de pressão sonora no escritório.

Solução

Agora, a absorção no escritório é

$$A = 0.16 \times V/T = 0.16 \times 210/0.7 = 48 \text{ m}^2$$

Então

$$\begin{aligned} L_2 &= L_1 - R + 10\log S - 10\log A \\ &= 85 - 50 + 10\log(21) - 10\log(48) = 31.4 \text{ dB} \end{aligned}$$

Exemplo

Um grande workshop deve ser dividido usando uma partição para criar um espaço de escritório. Numa banda de oitava específica, o nível de pressão sonora reverberante na oficina é de 85 dB e não se espera que isso mude quando a partição estiver no lugar. As dimensões do escritório serão de 5 m x 6 m x 3 m e a divisória terá dimensões de 5 m x 3 m. A partir das medições num escritório semelhante, estima-se que o coeficiente de absorção médio das superfícies do escritório seja 0.1. Para condições de trabalho confortáveis, é necessário que o nível de som reverberante no escritório, resultante da transmissão de som através da partição, seja limitado a 35 dB nessa banda de oitava específica. Determine o índice mínimo de redução de som da partição necessária para satisfazer este critério.

Solução

Primeiro, vamos determinar a absorção sonora no escritório:

$$A = S \times \alpha_{\text{MED}} = 2 \times \left[(5\times6) + (5\times3) + (6\times3)\right] \times 0.1 = 12.6 \text{ m}^2 \qquad \text{e então}$$

$$\begin{aligned} R &= L_1 - L_2 + 10\log S - 10\log A \\ &= 85 - 36 + 10\log(15) - 10\log(12.6) = 49.8 \text{ dB} \end{aligned}$$

Finalmente, vamos considerar a transmissão de som através de uma fachada de edifício.

Passos:

1. Determine o nível sonoro, L_{FORA}, do lado de fora da fachada, resultante da transmissão de som através da fachada:

$$L_{FORA} = L_{DENTRO} - R - 6$$

onde L_{IN} é o nível de som reverberante dentro, e R o índice de redução de som da fachada.

2. Calcule o nível de potência sonora da fachada, atuando como uma fonte sonora que irradia som na direção do ponto de receção

$$L_W = L_{FORA} + 10\log S$$

onde S é a área da fachada.

3. Determine o nível sonoro no ponto de receção

$$L_R = L_W - 20\log R - 11 - D$$

Exemplo

Uma pequena fábrica de um andar contém uma janela de índice de redução de som de 20 dB e área de 2 m x 2 m. O nível de som reverberante dentro da fábrica é de 85 dB numa banda de oitava específica. Calcule o nível de som irradiado através da janela para um ponto de recepção sensível ao ruído a 40 m de distância da janela.

Solução

1. $L_{FORA} = L_{DENTRO} - R - 6 = 85 - 20 - 6 = 59$ dB

2. $L_W = L_{FORA} + 10\log S = 59 - 10\log 4 = 65$ dB

3. $L_R = L_W - 20\log R - 11 - D = 65 - 20\log 40 - 3 = 42$ dB

Problemas

1. Uma sala de aula de 16 m de comprimento, 12.5 m de largura e 5 m de altura tem um tempo de reverberação de 0.7 s. Qual é o coeficiente de absorção médio das superficies usando a equação de Eyring?

2. Uma sala com as dimensões 16 m de comprimento, 10 m de largura e 5 m de altura, inicialmente usada como laboratório vai ser transformada numa sala de aulas para 200 pessoas. A parede e o chão têm um coeficiente de absorção 0.05. Determine a área de azulejos acústicos (de coeficiente de absorção 0.75) necessária para a sala de aulas ter um tempo de reverberação de 0.87 s. A absorção para cada pessoa sentada é 0.4 m^2.

3. Os tempos de reverberação de uma câmara de reverberação de volume 1300m^3 vazia e com uma amostra foram obtidos e apresentadas na tabela:

Frequência (Hz)	Tempo de reverberação (sala vazia) (s)	Tempo de reverberação com amostra (30 m^2) (s)
125	16.8	10.2
250	20.1	10.4
500	18.5	9.4
1000	14.5	8.0
2000	9.1	6.1

O coeficiente de absorção médio de todas as superficies é menor do que 0.2. Determine os coeficientes de absorção do material às frequências dadas.

4. Uma sala de 4000 m^3 de volume tem um tempo de reverberação de 2 s. Quanto material acústico absorvente é necessário para reduzir o nível de ruído reverberante por 6 dB?

5. Uma oficina de fábrica com superfícies duras uniformes tem dimensões de 30m x 15m x 6m e um tempo de reverberação de ponderação-A de 3 s. O nível de ruído na oficina é 98 dB(A). Determine o nível de ruído se o teto é coberto com um absorvente acústico com um coeficiente de absorção de ponderação-A de 0.8.

6. Uma oficina de volume 1000m^3 tem um tempo de reverberação de 3s. O nível de pressão acústica com todas as máquinas em uso é 105 dB a uma frequência específica. Se o tempo de reverberação é reduzido ao valor de 0.75s, qual é o novo valor do nível de pressão acústica?

7. O tempo de reverberação de uma sala de conferência de volume 500 m^3 e o valor ideal para três bandas de oitava são dados na tabela, juntamente com a absorção por pessoa. Calcule quantas pessoas são necessárias na plateia para atingir o valor ideal.

Frequência (Hz)	125	500	2000
Tempo de reverberação ideal	1.6	1.2	1.1
Valor atual	1.9	1.7	1.6
Absorção por pessoa (m^2)	0.17	0.43	0.47

8. Uma parede externa de área de 4 m x 2.5 m, numa casa de frente para uma rodovia, é necessária para ter uma redução de som de 50 dB. A construção consiste numa parede de cavidades contendo uma janela com vidros duplos. Os índices de redução de som são 55 dB para a parede e 44 dB para a janela. Calcule o tamanho máximo da janela para obter o isolamento necessário.

9. Uma porta com índice de redução de som de 20 dB na banda de oitava de 2000 Hz tem 2 m de altura por 1 m de largura. Ele é colocado numa parede de 6 m de comprimento por 2.5 m de altura, que possui um índice de redução de som de 50 dB na mesma faixa de frequência. Determine o índice de redução de som se (a) a porta se encaixar perfeitamente; (b) existe uma brecha de 3 mm em torno da borda da porta.

10. O nível de pressão sonora dentro de uma oficina de fábrica é de 108 dB na banda de oitavas de 500 Hz. O ruído emana de uma fachada longa e leve (dimensões 100 m x 25 m e índice de redução de som 20 dB) da fábrica. Calcule o nível de ruído nessa banda de oitava nos pontos de recepção a 20 m, 50 m e 200 m de distância da fachada numa direção perpendicular à fachada.

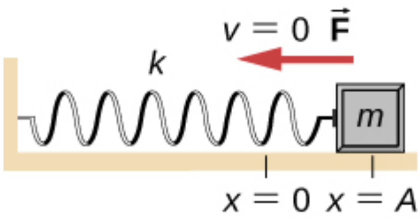
5. Vibrações

Introdução

Nesta seção, vamos considerar a natureza de vibração e a resposta humana a vibração.

A natureza de vibração

Quando um corpo for deslocando da sua posição de equilíbrio, ocorre o movimento harmónico simples se a força restauradora for proporcional ao deslocamento:



e

$$F_x = -kx$$

onde k é uma constante (a constante da mola). Combinando esta equação com a segunda lei de Newton,

$$F_x = -kx = ma = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

ou

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

Deslocamento, velocidade e aceleração

Sempre que a aceleração de um corpo for proporcional ao deslocamento, e tiver direção oposta ao deslocamento, o corpo move-se com movimento harmónico simples e temos

$$x = A\cos(\omega t + \phi)$$

$(\omega t + \phi)$ é a fase e ϕ é a constante de fase. Também

$T = 2\pi/\omega$ e $f = 1/T = \omega/2\pi$

onde ω é a frequência angular.

Agora, a primeira derivada de *x* em relação ao tempo dá a velocidade

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \phi)$$

e a segunda derivada dá a aceleração

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi)$$

ou

$$a = -\omega^2 x$$

Assim, $\omega^2 = k/m$ e $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Essas relações, que se aplicam apenas a vibrações de frequência única, também se aplicam aos valores RMS ($\text{amplitude}/\sqrt{2}$).

Exemplo

Um painel está a vibrar a uma frequência de 100 Hz. O valor RMS da velocidade é medido no centro e é 1.0 mm / s. Determine o valor RMS e o máximo do deslocamento.

Solução

$A_{RMS} = 1/2\pi fA = 1/2 \times 3.142 \times 100 = 1.6 \times 10^{-3}$ mm

$A = A_{RMS}/\sqrt{2} = 1.6 \times 10^{-3}/\sqrt{2} = 2.25\ \mu\text{m}$

Agora, a diferença *N* em decibels entre dois níveis de vibração é dada por

$$N = 10\log(A/A_0)^2 = 20\log(A/A_0)$$

Exemplo

O magnitude de deslocamento de uma vibração é 250 μm . Qual é o valor em dB re. 10^{-11} m ?

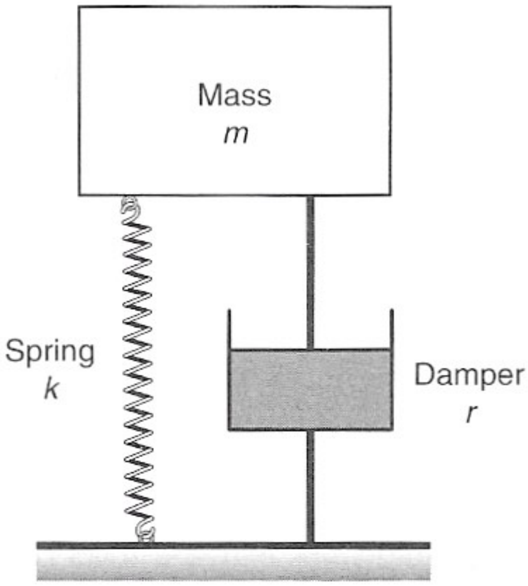
Solução

$N = 20\log(A/A_0) = 20\log(250 \times 10^{-6}/10^{-11}) = 148$ dB re. 10^{-11} m

Oscilações amortecidas

Nos movimentos oscilatórios reais, há dissipação de energia mecânica em virtude da ação de forças de atrito

- o movimento é amortecido.



A compreensão desse sistema é útil para muitas áreas da acústica, incluindo a resposta de freqüência de microfones e acelerômetros, a lei de massas do isolamento acústico e a teoria do isolamento de vibrações.

Para explicar o amortecimento, podemos supor que além da força elástica, existe uma força que se opões à velocidade (por exemplo, viscosidade) dada por

$$R = rv$$

onde r é a constante de amortecimento.

Então, podemos escrever

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx - rv$$

ou

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + r\frac{dx}{dt} + kx = 0$$

Não vamos considerar as soluções detalhadas desta equação.

Contudo,

há três soluções diferentes, dependendo da grau de amortecimento - o valor do coeficiente de amortecimento, *b*.

Estas três soluções correspondem a três situações físicas:

- sub-amortecimento
- sobre-amortecimento
- amortecimento crítico

O valor do coeficiente de amortecimento r_c, que provoca amortecimento crítico é dada por

$$r_c = 2\sqrt{km}$$

A quantidade de amortecimento num sistema vibratório é descrita pela razão de amortecimento:

$$\xi = \frac{(\text{coeficiente de amortecimento do sistema})}{(\text{coeficiente de amortecimento quando amortecido criticamente})}$$

e

$\xi = 1$ - amortecimento crítico
$\xi < 1$ - sub-amortecimento
$\xi > 1$ - sobre-amortecimento

A solução da equação diferencial para o caso de sub-amortecimento tem a forma:

$$x = A \sin \omega_d t e^{-(r/2m)t}$$

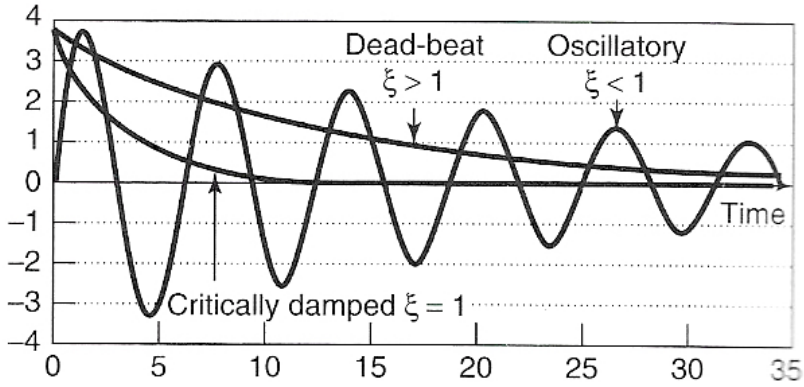
ou de forma geral

$$x = \left(A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t\right) A e^{-(r/2m)t}$$

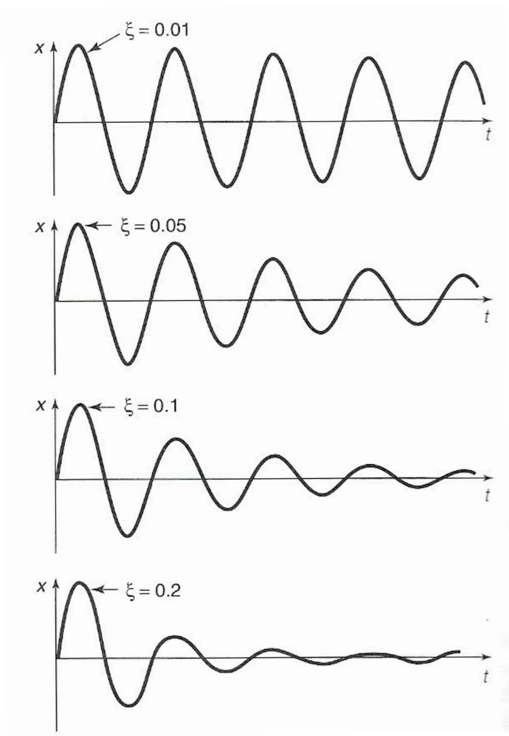
Há uma relação simples entre ω_d e ω_0:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{\left(1 - \xi^2\right)}\,.$$

- ω_d é um pouco menor que ω_0.
- A amplitude da vibração não é mais constante, mas decai exponencialmente com o tempo, dependendo do valor de r.

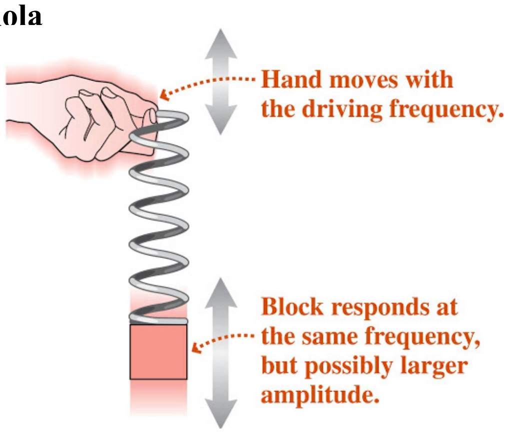


Com valores pequenos de ξ:



Vibrações forçadas de um sistema massa-mola

Movimento forçado de um oscilador ocorre quando s aplica uma força oscilatória a uma partícula sujeita a uma força elástica. Por exemplo, um corpo pendurado numa mola vertical pode ser excitado pelo movimento para baixo e para cima o ponto de suporte da mola.



Vamos considerar o caso em que todo o movimento e todas as forças são ao longo do eixo *x*.

A força oscilante aplicada é

$$F = F_0 \cos \omega t$$

ω é a frequência angular da força excitadora que em geral não está relacionada com a frequência angular natural do sistema ω_0 $(= \sqrt{k/m})$. Então, a equação de movimento é

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -r\frac{dx}{dt} - kx + F_0 \cos \omega t$$

ou

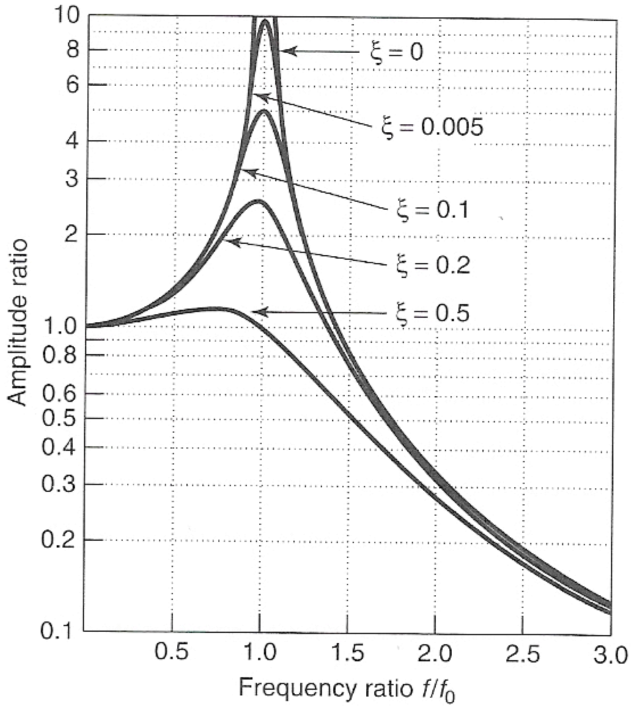
$$m\frac{d^2x}{dt^2} + r\frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega t$$

A solução desta equação é da forma

$$x = A\sin(\omega t - \alpha)$$

onde *A* é a amplitude da vibração forçada, e α é um ângulo que representa a diferença de fase entre a força aplicada e a resposta. *A* é dada por

$$A = \frac{F/k}{\sqrt{\left[1-(f/f_0)^2\right]^2 + \left[2\xi(f/f_0)\right]^2}}$$



A amplitude da vibração na ressonância depende da quantidade de amortecimento no sistema, ξ.

Finalmente, o fator Q do sistema, também relacionado com a quantidade de amortecimento, é dado por

$$Q = \frac{\text{amplitude de deslocamento em ressonância}}{\text{deslocamento estático produzido pela mesma força}}$$

ou

$$Q = f_0 / (f_2 - f_1)$$

onde f_1 e f_2 são os chamados pontos de meia potência, isto é, as frequências de ambos os lados da ressonância nas quais a amplitude da vibração forçada caiu para $1/\sqrt{2}$ do seu valor de ressonância, e

$$Q = 1/2\xi$$

Exemplo

A frequência natural de um sistema massa-mola é 150 Hz, e os pontos de meia potência são 155 Hz e 145 Hz. Quais são os valores de Q e ξ?

Solução

$Q = f_0/(f_2 - f_1) = 150/(155 - 145) = 15$ e $\xi = 1/(2\times 15) = 0.033$

Isolamento de vibrações

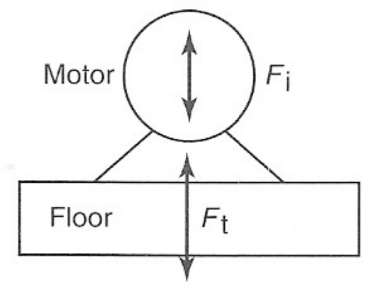
O princípio do isolamento da vibração é que a amplitude da vibração forçada de um sistema vibratório reduz-se a valores baixos quando o sistema está operando bem acima da ressonância, ou seja, quando a frequência de acionamento está bem acima da frequência natural, ou

$$f \gg f_0$$

ou, como regra geral

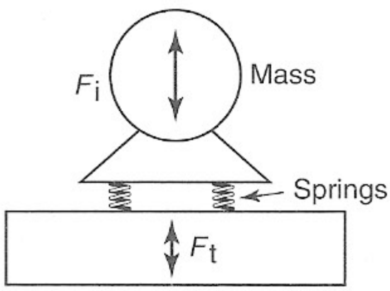
$$f > 3 f_0$$

Vamos considerar a situação onde um motor está ligado diretamente ao chão:



Como as partes rotativas do motor nunca podem ser perfeitamente equilibradas, a rotação resulta num componente vertical de uma força e essa força vibratória é transmitida ao chão, onde pode causar distúrbios.

Com a adição de molas (isoladores de vibração),



temos um **sistema massa-mola** com uma frequência natural f_0.

Vamos considerar uma velocidade de rotação de 3000 rotações por minuto, então

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Para que o sistema mola-massa seja forçado a vibrar acima da ressonância, a frequência natural precisa ser

$$f_0 < \frac{50}{3} = 16.7 \text{ Hz}$$

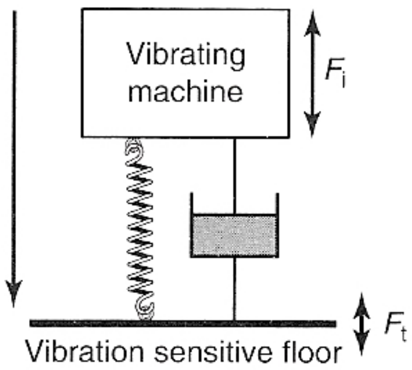
Isso é organizado selecionando a rigidez das molas em conjunto com a massa do motor usando:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

O resultado será uma redução na força de transmissão F_t ou seja a vibração produzida pelo motor será isolada.

Vamos agora considerar o parâmetro: transmissibilidade, T:

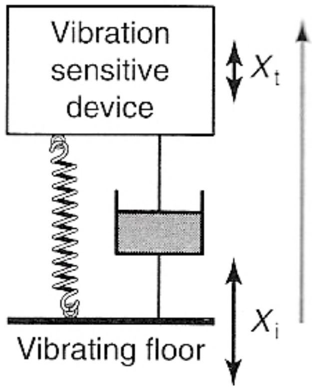
Caso 1:



Aqui queremos isolamento da vibração da maquina (ver caso anterior) e

$$T_F = \frac{\text{Força transmitida ao chão}}{\text{Força à maquina vibratória}} = \frac{F_t}{F_i}$$

Caso 2:



Aqui queremos isolamento da vibração do chão e

$$T_X = \frac{\text{Deslocamento transmitido ao dispositivo sensível}}{\text{Deslocamento ao chão}} = \frac{X_t}{X_i}$$

Para um sistema massa - mola - amortecedor

$$T_F = T_X = T$$

- os dois casos são idênticos, e se

$T > 1$	- há amplificação
$T < 1$	- há isolamento.

O rendimento de isolamento é definido como

$$\eta = (1 - T) \times 100\ \%$$

Por exemplo,

se $T = 0.1$, $\eta = (1 - 0.1) \times 100 = 90\ \%$

se $T = 0.01$, $\eta = (1 - 0.01) \times 100 = 99\ \%$

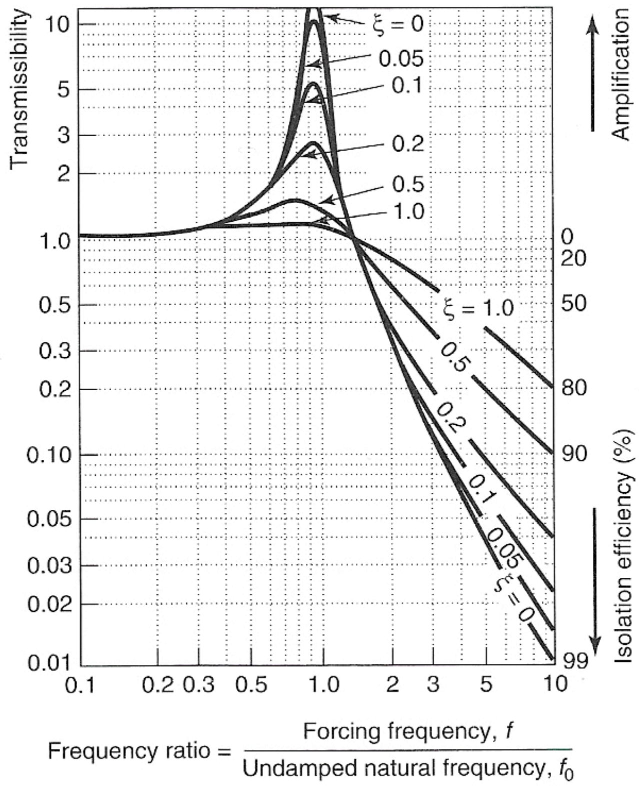
Finalmente, a redução, N, em dB é dada por

$$N = 10 \log (1/T)^2 = 20 \log (1/T)$$

Por exemplo,

se $T = 0.1$, $N = 20 \log (1/0.1) = 20$ dB

Agora, variação da transmissibilidade como função da frequência e com a razão de amortecimento:



Com $f > f_0$ há melhor isolamento com $\xi \ll 1.0$

Com $f \approx f_0$ há melhor isolamento com $\xi \approx 1.0$

- há dificuldades: pequeno amortecimento dá melhor isolamento com $f > f_0$ mas dá amplitudes de vibração altas perto de ressonância.

Uma expressão para a transmissibilidade é dada por

$$T = \sqrt{\frac{1 + 4\xi^2 (f/f_0)^2}{\left(1 - (f/f_0)^2\right)^2 + 4\xi^2 (f/f_0)^2}}$$

e com $\xi = 0$ (quando $f > f_0$)

$$T = \frac{1}{\left[(f/f_0)^2 - 1\right]}$$

Exemplo

(a) Um ventilador está ligado a uma placa de metal que é montada sobre molas em conjunto com um amortecedor. Explica porque é que é necessário selecionar as características de molas e amortecedor viscoso para minimizar a a transmissão de vibrações para o chão. Ilustre a sua resposta, por referência ao conceito de transmissibilidade e esboce curvas de transmissibilidade típico para este sistema.
(b) Se a massa do ventilador e placa é 1000 kg, e o ventilador roda a 1500 RPM, determine a constante da mola para reduzir a força de vibração transmitida ao chão por um fator de 20 (assuma que $\xi = 0$) e também determine a frequência natural do sistema e a deflexão das molas.
(c) Molas estão disponíveis com uma constante de mola combinada de 987 kN/m e razões de amortecimento 0.1, 0.05 e 0.01. Realiza cálculos para decidir a mola mais apropriada para a aplicação.

Solução

(a) Ver apontamento.

(b)

$f =$ 25 Hz.

Usando $T = \dfrac{1}{\left[\left(f/f_0\right)^2 - 1\right]}$,

$f/f_0 = 4.58$ e

$f_0 = 25/4.58 = 5.5$ Hz

Agora, sabemos que

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Usando a lei de Hooke,

$mg = kX_S$, temos

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{X_S}}$$

Com X_S em mm

$$f_0 = 15.8\sqrt{\frac{1}{X_S}}$$

Rearranjando

$$X_S = \left(15.8/f_0\right)^2 = \left(15.8/5.5\right)^2 = 8.3 \text{ mm}$$

e usando

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{temos}$$

$$k = 4\pi^2 f_0^2 m = 4\times 3.142^2 \times 5.5^2 \times 1000 = 1180 \text{ kN/m}$$

(c)

Se k = 987 kN/m,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\times 3.142}\sqrt{\frac{987}{1000}} = 5.0 \text{ Hz}$$

e

$$f/f_0 = 25/5 = 5$$

Podemos agora calcular os valores de T:

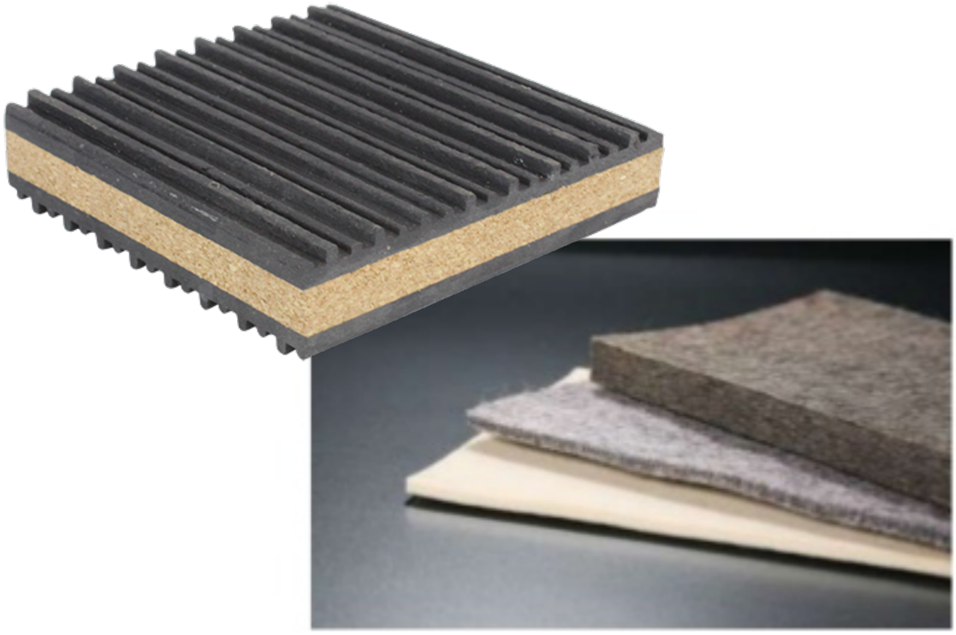
108	$f/f_0 = 5$	$f/f_0 = 1$
$\xi = 0.01$	0.04	50.0
$\xi = 0.05$	0.05	10.0
$\xi = 0.01$	0.06	5.1

$\xi = 0.05$ dará o isolamento necessário desde que o valor de amplificação de ressonância de 10.0 pode ser tolerado.

Uma grande variedade de materiais resilientes pode ser usada como isoladores de vibração.

25 Hz e acima:

Aqui, cortiça, compósitos de cortiça, feltro, plástico espumado e borracha espumada podem ser usados na forma de almofadas ou tapetes.

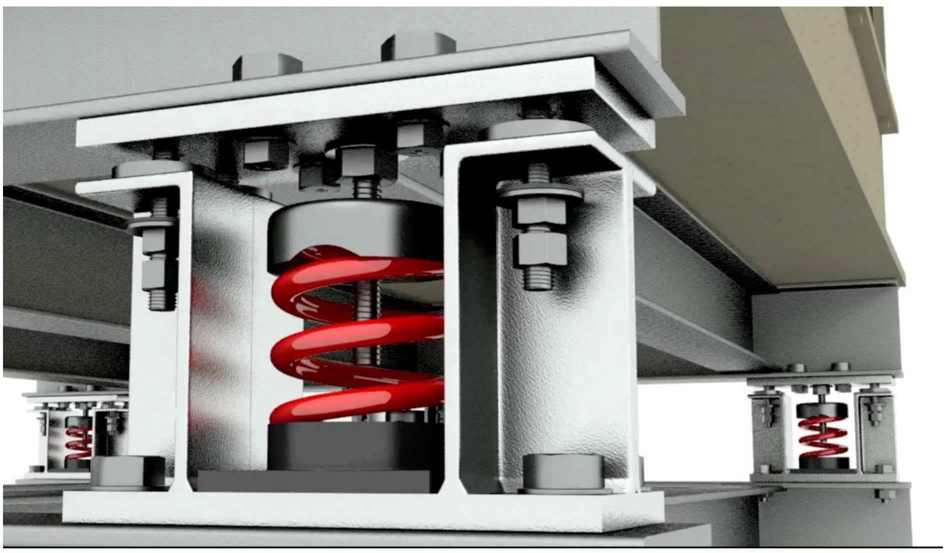


5-35 Hz:

Aqui, materiais de borracha e elastômero são usados em uma ampla variedade de formas.

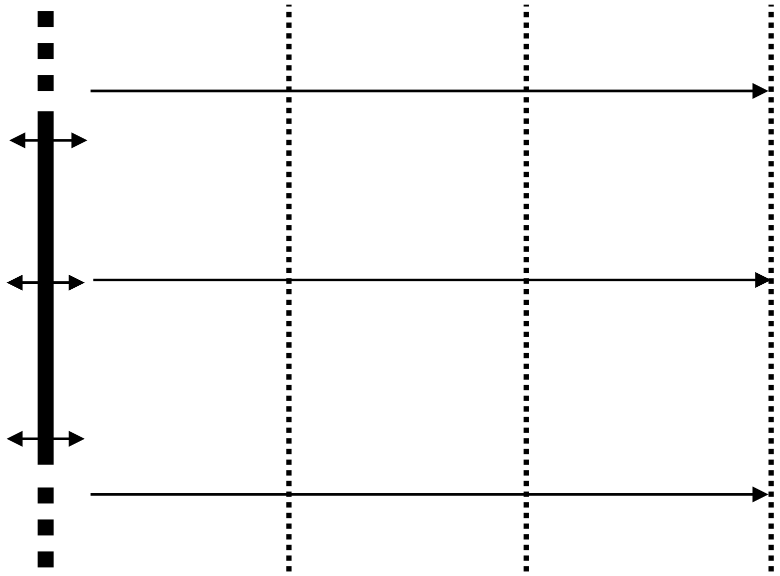
2-15 Hz

Aqui, molas metálicas são usadas. As vantagens das molas são que elas podem ser projetadas e fabricadas numa variedade de formas para fornecer a rigidez necessária. Embora sejam eficazes no isolamento de vibrações de baixa frequência, as altas frequências viajam ao longo das bobinas - uma almofada de neoprene é usada para reduzir a transmissão dessas altas frequências.



Radiação do som de uma superfície em Vibração

Seja V a velocidade de vibração da superfície em vibração:



Vamos deduzir expressões para:

- a pressão p
- a velocidade das partículas U
- a intensidade I
- o nível de intensidade sonora L_I
- o nível de pressão sonora L_P

1. Numa onda plana não há divergência e então não há variação com a distância da fonte da velocidade das partículas U.
Desde que deve haver continuidade física da velocidade da partícula no plano rígido

$$U = V$$

2. Agora

$$p = Uz$$
$$I = pU$$
$$I = p^2/z$$
$$I = zU^2$$

onde $z = \rho c$.

3. Então podemos relacionar a velocidade U com o nível de pressão e a intensidade sonora:

- usando $p = \rho c U$ e

ou

- usando $I = \rho c z^2$ e $L_I = 10\log\left(I/I_0\right)$

Exemplo

A vibração de um painel de uma maquina é 1 g RMS ($= 9.81\ \mathrm{m/s^2}$) com uma frequência 1000 Hz. Determine o nível de pressão acústica irradiado pelo painel, assumindo que o painel comporta-se como um radiador de uma onda plana.

Solução

Agora, como

$A = 2\pi f V$

temos

$V = A/2\pi f = 9.81/2\times 3.142\times 1000 = 1.6\times 10^{-3}\ \mathrm{m/s}$

Portanto

$U = V = 1.6\times 10^{-3}\ \mathrm{m/s}$

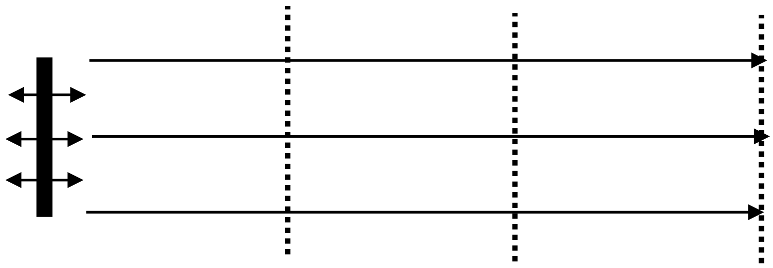
Como $z = \rho c = 415\ \mathrm{kgm^{-2}s}$, temos

$p = Uz = 1.6\times 10^{-3}\times 415 = 0.65\ \mathrm{Pa}$

e

$L_P = 20\log\left(p/p_0\right) = 20\log\left(0.65/2\times 10^{-5}\right) = 90\ \mathrm{dB}$

Para o caso de um painel de extensão *finita*:



a intensidade sonora é dada por

$$I = \sigma z V^2$$

onde σ é o fator de eficiência de radiação e

$$\sigma = \frac{\text{A energia sonora irradiada pela superficie real}}{\text{Aa energia sonora que seria irradiada pela mesma superfície, assumindo que irradiava ondas planas}}$$

Assim

$\sigma = 1$ - para um radiador de ondas planas ideal

$\sigma = 0 \rightarrow 1$ - para um radiador real.

Para uma superfície de área *S* a potência irradiada

$$\begin{aligned} W &= IS \\ &= \sigma S z V^2 \end{aligned}$$

e o nível de potência

$$L_W = 10\log\left(W/W_0\right)$$

onde $W_0 = 10^{-12}$ W/m^2

O nível de pressão é

$$L_W = L_P + 10\log\left(\sigma\right)$$

Para determinar o nível de pressão sonora a uma distância grande *r* da superfície, assumimos que a superfície comporta-se como uma fonte pontual e

$$L_P = L_W - 20\log r - 11$$

Problemas

1. A amplitude de aceleração de vibração do chão de um escritório localizado ao lado de uma oficina é 0.3 m/s2 com a frequência de 30 Hz. Determine as amplitudes da velocidade e do deslocamento.

2. A amplitude de deslocamento de vibração medida no rés do chão de uma casa perto de um estaleiro de obras é 0.002 mm a uma frequência de 50 Hz. Quais são as amplitudes correspondentes de velocidade e aceleração?

3. O máximo nível de vibração permitido numa determinada área de trabalho é 10 mm/s. Determine os níveis máximos correspondentes de deslocamento e aceleração para vibrações de 10 Hz.

4. Dois níveis de vibração são medidos e os resultados são apresentados em termos de decibéis re 1 g. O primeiro nível é +7 dB e o segundo nível é -5 dB. Converta os dois níveis em valores absolutos e em decibéis re 10-6 m/s2.

5. A velocidade de vibração de uma superfície é 103 dB re. 10-6 m/s2. Qual é o valor absoluto em mm/s?

6. O valor estimado para a frequência de ressonância de um painel fino com a massa de 120 g de uma máquina, é de 1200 Hz. Os níveis de vibração no centro do painel são medidos utilizando um acelerómetro de 80 g de massa. Determine a frequência de ressonância do painel com o acelerómetro ligado ao painel.

7. Uma máquina de grandes dimensões vibra a uma frequência de 850 Hz. A medição do nível de vibração indica uma aceleração RMS de 12.3 m / s^2. Determine o nível de pressão acústica irradiada a partir de um painel da máquina numa posição junto ao painel (z = 410 rayls).

8. Uma máquina, com uma velocidade de operação de 300 rpm e massa de 500 kg, é montada sobre quatro molas paralelas. Determine a constante de mola de cada mola que permita uma redução na força transmitida de 20 dB.

9. Um gerador diesel de grande dimensão de massa 18000 kg operando a 1500 rpm vai ser isolado do chão usando oito molas idênticas. Qual deverá ser a constante da mola para conseguir um rendimento de isolamento de 95%. Assuma o valor zero para o amortecimento da mola.

10. A vibração RMS no chão de cimento de um estúdio localizado acima de uma linha de metro é 3×10^{-6} m/s. O chão tem a área de 30 m^2 e o nível de potência sonora irradia devido à vibração é 50 dB re. 10^{-12} W. Determine o rendimento de radiação do chão. (z = 415 rayls).